

Strategien zur Steuerung der Bewässerung im Gewächshaus und Konsequenzen für die Strukturierung von Leitrechnersystemen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum horticolarum

(Dr. rer. hort)

eingereicht an der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

der Humboldt-Universität zu Berlin

von

Dipl.-Ing. (FH) Michael Beck

geb. 10.10.1965 in München

Präsident

der Humboldt Universität zu Berlin

Prof. Dr. H. Meyer

Dekan der

Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

Prof. Dr. Dr. h.c. E. Lindemann

Gutachter: 1. Prof. Dr. U. Schmidt
 2. Prof. Dr. S. Kleisinger
 3. Doz. Dr. Dr. h. c. M. Böhme

Tag der mündlichen Prüfung: 04.07.2000

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | Einleitung | 7 |
| 2 | Leitrechnersysteme für den Anbau im Gewächshaus | 9 |
| 2.1 | Baugruppen eines Leitrechnersystems | 9 |
| 2.2 | Struktur der Leitrechnersysteme | 11 |
| 2.3 | Kontrollstrategien | 14 |
| 2.4 | Teilbereiche der Prozessautomatisierung | 16 |
| 2.4.1 | Klimasteuerung | 17 |
| 2.4.2 | Bewässerungssteuerung | 18 |
| 2.5 | EDV-geführte Betriebssteuerung | 22 |
| 3 | Der Wasserhaushalt in Boden, Pflanze und Atmosphäre | 24 |
| 3.1 | Das Potentialkonzept | 24 |
| 3.2 | Das Wasser im Boden | 26 |
| 3.2.1 | Einteilung des Bodenwassers | 26 |
| 3.2.2 | Das Wasserpotential des Bodens | 27 |
| 3.2.3 | Wasserbewegung im Boden | 28 |
| 3.2.4 | Wasserverteilung unter einer Tropfstelle | 30 |
| 3.2.5 | Methoden zur kontinuierlichen Messung des Bodenwassers | 31 |
| 3.2.5.1 | TDR-Methode | 31 |
| 3.2.5.2 | Leitfähigkeitsmessung | 31 |
| 3.2.5.3 | Kapazitive Methode | 32 |
| 3.2.5.4 | Tensiometrie | 33 |
| 3.2.6 | Wasserspannung und Wassergehalt | 33 |
| 3.2.7 | Wasserspannung und Pflanzenwachstum | 34 |
| 3.3 | Das Wasser in der Pflanze | 36 |
| 3.3.1 | Widerstände für das Wasser in der Pflanze | 37 |
| 3.3.2 | Wasserverbrauch und Blattfläche | 38 |
| 3.3.3 | Wasserverbrauch und Nährstoffversorgung | 39 |
| 3.3.4 | Wasserstress der Pflanzen | 40 |
| 3.4 | Zusammenhänge zwischen Transpiration und Klima | 41 |
| 3.4.1 | Transpiration und das Wasserpotential der Luft | 41 |
| 3.4.2 | Transpiration und Temperatur | 44 |
| 3.4.3 | Transpiration und Strahlung | 45 |
| 3.4.4 | Transpiration und Luftbewegung | 46 |
| 3.5 | Modelle zur Wasserbedarfsberechnung | 47 |
| 3.5.1 | Verdunstung an Wasseroberflächen | 48 |
| 3.5.2 | Evapotranspiration | 48 |
| 3.5.3 | Wasserverbrauch von Gewächshauskulturen | 49 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4 | Versuche zur Ermittlung geeigneter Parameter für die Bewässerungssteuerung von Gewächshauskulturen | 51 |
| 4.1 | Versuchsziel | 52 |
| 4.2 | Material und Methoden | 52 |
| 4.2.1 | Versuchsort | 52 |
| 4.2.2 | Versuchszeitraum | 52 |
| 4.2.3 | Technischer Aufbau der Versuche | 53 |
| 4.2.3.1 | Ermittlung von Gieß- und Sickerwassermenge | 53 |
| 4.2.3.2 | Bestimmung von pF-Kurven | 54 |
| 4.2.3.3 | Wasserverteilung in und um Tropfstellen | 55 |
| 4.2.3.4 | Wasserumsatz in Abhängigkeit verschiedener Parameter | 55 |
| 4.2.4 | Begriffsbestimmungen und statistische Methoden | 57 |
| 4.3 | Ergebnisse | 61 |
| 4.3.1 | Bodenspezifische Parameter | 61 |
| 4.3.1.1 | Wasserspeicherfähigkeit des Bodens | 61 |
| 4.3.1.2 | Einfluss des Matrixpotentials auf Transpiration und Ertrag | 64 |
| 4.3.1.3 | Wasserumsatz in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs | 66 |
| 4.3.2 | Pflanzliche Parameter | 71 |
| 4.3.2.1 | Blattfläche | 71 |
| 4.3.2.2 | Blatttemperatur | 76 |
| 4.3.3 | Wasserumsatz in Abhängigkeit der klimatischen Parameter | 78 |
| 4.3.3.1 | Einstrahlungssumme | 78 |
| 4.3.3.2 | Sättigungsdefizitsumme | 84 |
| 4.3.3.3 | Dampfdruckdifferenzsumme | 89 |
| 4.3.4 | Wasserumsatz in Abhängigkeit der Kombination mehrerer Einzelgrößen | 93 |
| 4.3.4.1 | Einstrahlungs- und Sättigungsdefizitsumme | 93 |
| 4.3.4.2 | Einstrahlungs- und Dampfdruckdifferenzsumme | 94 |
| 4.3.4.3 | Einstrahlungs-, Sättigungsdefizitsumme und Pflanzenwachstum | 94 |
| 4.3.5 | Zusammenfassende Darstellung der Einzelergebnisse | 96 |
| 5 | Diskussion | 99 |
| 5.1 | Eignung verschiedener Parameter zur Steuerung der Bewässerung | 99 |
| 5.1.1 | Bodenspezifische Parameter | 99 |
| 5.1.2 | Pflanzliche Parameter | 103 |
| 5.1.3 | Klimatische Parameter | 105 |
| 5.1.4 | Kombination pflanzliche und klimatische Parameter | 108 |
| 5.2 | Kontrollstrategien zur Bewässerungssteuerung | 109 |
| 5.3 | Klima- und Bewässerungssteuerung in einem Prozessleitsystem | 114 |
| 5.4 | Prozesssteuerung als Teilbereich der computer integrated Manufacture | 118 |

| | | |
|----|-----------------------|-----|
| 6 | Zusammenfassung | 119 |
| 7 | Thesen | 122 |
| 8 | Abbildungsverzeichnis | 124 |
| 9 | Abbildungen im Anhang | 129 |
| 10 | Tabellenverzeichnis | 130 |
| 11 | Tabellen im Anhang | 132 |
| | ANHANG | 136 |
| | BEDANKUNG | 146 |
| | LEBENS LAUF | 147 |
| | LITERATUR | 148 |

ABSTRACT (DEUTSCH)

Transpiration, Bewässerung, Prozessautomatisierung, Modellierung

Die wesentlichen Einflussgrößen auf den Wasserverbrauch von Pflanzen sind klimatischer Art, die Pflanze selbst und der Wasserhaushalt des Bodens. Als wichtige klimatische Einflussgrößen sind das Sättigungsdefizit der Luft bzw. die Dampfdruckdifferenz zwischen Blatt und Luft und die Einstrahlung zu nennen. Die Einstrahlung beeinflusst das Gewächshausklima und hat eine direkte Wirkung auf die Öffnungs- und Schließbewegung der Stomata. Die Bodenfeuchte ist sowohl im Hinblick auf die Wasseraufnahme der Pflanzen als auch bei einem Anbau im gewachsenem Boden auf eine mögliche Sickerwasserbildung und damit eine Nährstoffauswaschung von Bedeutung. Die im Gewächshausanbau eingesetzten Prozessleitsysteme berücksichtigen die Wechselwirkungen der Einflussfaktoren auf den Wasserumsatz eines Pflanzenbestandes nur bedingt. Einzelne Parameter wie z.B. die Einstrahlungssumme oder das Matrixpotential des Bodens werden zwar zur Steuerung der Bewässerung verwendet, eine Kombination der Einflussfaktoren wie z.B. die Anpassung der Einstrahlungssumme an das Pflanzenwachstum muss bisher vom Anwender vorgenommen werden.

Zur Darstellung der Zusammenhänge des Wasserumsatzes eines Pflanzenbestandes im Gewächshausanbau wurde in den experimentellen Untersuchungen der Wasserumsatz in Abhängigkeit der Bodenfeuchte (Matrixpotential), der klimatischen Größen (Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitssumme und Dampfdruckdifferenzsumme) an *Lactuca sativa*, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* und *Cucumis sativus* untersucht.

Aufgrund des hohen Bestimmtheitsmaß und niedrigen Variationskoeffizienten sowie der Übertragbarkeit auf verschiedene Bodenarten und Kulturen ist die Matrixpotentialmessung als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung zu verwenden. Da die häufig eingesetzten Tensiometer bzw. Tensiometer, bauartbedingt Schwächen aufweisen sind diese Sensoren durch übergeordnete Modellrechnungen zu kontrollieren. Dazu ist die Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitssumme und der Gießabstand zu verwenden. Die klimatischen Parameter müssen über entsprechende Modellrechnungen und der Analyse bereits ausgeführter Gießakte dem Pflanzenwachstum angepasst werden.

Nachdem bereits einige Prozessleitsysteme die für die Bewässerung- und Klimasteuerung notwendigen Hardwarekomponenten in ein System integriert haben, muss die Verknüpfung auf Softwareebene realisiert werden. Hierzu müssen die Kontrollstrategien d.h. die Softwareroutinen entsprechend schnell angepasst werden können. Aufgrund der in den letzten Jahren gesteigerten Leistungsfähigkeit bieten sich hierzu Prozessleitsysteme auf PC-Basis an.

ABSTRACT (ENGLISH)

transpiration, irrigation, processcontrolling, models

The fundamental parameters determining the water consumption of plants are the climate, the plant itself and the soil water supply. The important climatic parameters are the water saturation deficit of the air or more correctly the water vapour pressure difference between leave surface and air, and the solar irradiation. The solar irradiation influences the greenhouse climate and has therefore an immediate effect on the opening and closing of the stomata. The soil humidity is important for both the water absorbtion of a plant and - when cultivating in soil - the possible losses of water and nitrogen into deeper soil layers causing environmental pollution of the ground water. The computer systems used for controlling the irrigation in greenhouses do not take the interactions of the influence coefficients on the water exchange of plants sufficiently into account. Single parameters like the irradiaton sum or the water tension are used for controlling irriagaton, but the combination of different influence factors like the adaption of the irradiation sum to the plant growth must be done by the user so far.

Several scientific trials were carried out to describe the water consumption of plants in greenhouses. The water consumption is defined by the water tension of the soil, the irradiotion sum, the water vapour pressure deficit sum and water vapour pressure difference sum. For the trials the plants *Lactuca sativa*, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* and *Cucumis sativus* were used.

The soil water tension measured by tensiometers proved to be the best parameter for controlling irrigation because of the highest stability index and the lowest variation coefficient as well as the transferability of this parameter to different soil types and plants. Because the construction of tensiometers and tensioswitches can cause problems, a superordinated model calculation has to control the sensors. This calculation is based on the parameters irradiation sum, water pressure deficit sum and irrigation intervals. The climatical control parameters must be adapted to the plant growth by using adequate model calculations and the analysis of previous irrigation events After a lot of computer systems for greenhouse process controlling integrated the hardware components necessary for irrigation and climatic control, this has to happen with the software basis as well. A quick update of the Software must be possible. Personal computers can be used because of the improved capacity.

1 EINLEITUNG

Um den aktuellen und zukünftigen Anforderungen in der Prozessautomatisierung gerecht zu werden sind die zur Bewässerungs- und Klimasteuerung im Gewächshausanbau eingesetzten Hard- und Softwarestrukturen zu überdenken (SCHMIDT 1996).

Der Zwang zur Kostensenkung, zur Minderung der Umweltbelastung, zur Qualitätssteigerung und zur zielorientierten Massenproduktion erfordert neue Technologien in der Produktion (HENDRICKS 1997). Aufgrund dieser Anforderungen und der Veränderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen wie z.B. Pflanzenschutzgesetz, Wasserschutzgebietsauflagen in Baden-Württemberg (SCHALVO 1991) und Düngemittelverordnung sind die Produktionsbetriebe gezwungen die Klima- und Bewässerungssteuerung zu optimieren.

Sowohl durch eine optimierte Bewässerungssteuerung als auch durch eine optimale Klimaführung kann der Fungizideinsatz minimiert werden (FRENZ 1993); (HENDRICKS 1997). Neue, dynamische Regelstrategien wie z.B. in der Klimaregelung „Cool Morning“ und „Diff“, sowie eine zeitweise trockene Kulturführung beeinflussen das Längenwachstum. Der Einsatz von Wuchshemmstoffen wird damit verringert (HENDRICKS et al. 1992).

Sowohl bei der Kultur im gewachsenem Boden als auch bei erdelosen Kulturverfahren ist die Bewässerungssteuerung dem Wasserverbrauch der Pflanzen anzupassen. Dadurch kann eine Wasserver-sickerung und damit eine Nährstoffauswaschung verhindert und bei den geschlossenen, rezirkulierenden Systemen die Drainwassermenge exakt eingestellt bzw. auf ein Minimum reduziert werden. Forschungsvorhaben wie z.B. „Waterman“ der europäischen Gemeinschaft zeigen die Dringlichkeit und den Bedarf einer Optimierung der Bewässerungssteuerung bei der Bodenkultur (BALDENDONCK 1997).

Die Transpiration wird hauptsächlich durch die Umgebungsbedingungen, d.h. durch das Gewächshausklima, bestimmt. Obwohl verschiedene Modelle klimatische Parameter berücksichtigen (HEIßNER 1997) und STANGHELLINI in (BAKKER et al. 1995) wird meist nur die außerhalb des Gewächshauses erfasste Einstrahlungssumme für die Bewässerungssteuerung verwendet. Mögliche Auswaschungsverluste werden bei dieser Methode nicht berücksichtigt.

Um Kontrollstrategien für eine automatische Bewässerungssteuerung abzuleiten werden im Rahmen dieser Arbeit die Zusammenhänge zwischen dem Wasserverbrauch, der Bodenfeuchte und dem Gewächshausklima untersucht.

Im Einzelnen werden folgende Teilaspekte bearbeitet:

- Analyse der bisher im Gartenbau zur Klima- und Bewässerungssteuerung eingesetzten Systeme.
- Darstellung der für eine Bewässerungssteuerung zu berücksichtigenden Faktoren.
- Zusammenhang zwischen dem Wasserverbrauch und dem Matrixpotential des Bodens.
- Einfluss des Gewächshausklimas (Einstrahlung und Luftfeuchte) auf den Wasserverbrauch und mögliche Konsequenzen für eine automatische Bewässerung.
- Algorithmen zur Automatisierung der Bewässerung.
- Aufbau von Hard- und Software künftiger Gewächshauscomputer zur Verknüpfung der Klima- und Bewässerungssteuerung

2 LEITRECHNERSYSTEME FÜR DEN ANBAU IM GEWÄCHSHAUS

2.1 BAUGRUPPEN EINES LEITRECHNERSYSTEMS

Wesentliche Bestandteile der Prozesssteuerung sind die Informationsgewinnung, Informationsverarbeitung und eine entsprechende Reaktion (Aktion). Die Leittechnik betrachtet dabei den Informationsgehalt der beteiligten Vorgänge. Die Produkteigenschaften und Prozesszustände charakterisieren den Produktionsprozess. Sie werden durch Sensoren gemessen oder über Modellrechnungen berechnet und im Prozessleitsystem automatisch verarbeitet. Je nach Vorgabe des Menschen oder der Strategie des Leitsystems wird der Prozess durch Steuergrößen über Aktoren beeinflusst (Abb. 2.1).

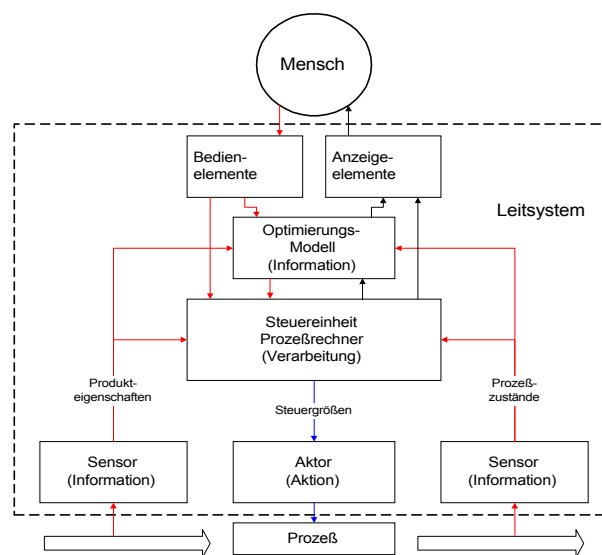


Abb. 2.1: Informationsgewinnung, Informationsverarbeitung und Aktion sind kennzeichnend für die Leittechnik (SCHÖN 1993).

Grundsätzlich wird angestrebt, mit Hilfe der Prozessleittechnik auf Betriebsleiterebene auch komplexe Zielsetzungen vorgeben zu können z.B. minimierter Produktionsmitteleinsatz. Die alleinige Informationsgewinnung über Sensoren, wie sie bei der Ablaufsteuerung oder Regelung eingesetzt wird, erweitern Modellrechnungen und Optimierungsprogramme (SCHÖN 1993).

Um die Prozessführung der Gewächshausbetriebe an die betriebsspezifischen Besonderheiten anzupassen fordert TANTAU einen modularen Aufbau der Hard- und Software (TANTAU 1995). Dadurch können die einzelnen Klimakomponenten für sich alleine oder durch eine Vernetzung im Verbund arbeiten. Eine nachträgliche Erweiterung sollte ohne Umbau der kleinsten Einheiten jederzeit möglich sein.

Aufgrund steigender Leistungsfähigkeit, verbesserter Graphikfähigkeit und vor allem der Multitaskingfähigkeit der Personal Computer wird die Idee, Leitsysteme auf der Basis von PC's aufzubauen forciert (SCHÖN 1993). Bei Spezialentwicklungen in der Hardware wie Industrierechnern oder aufwendigen Vorortrechnern ergibt sich häufig ein Widerspruch zwischen den Entwicklungskosten und der notwendigen Entwicklungsgeschwindigkeit. Aus Kostengründen werden daher verstärkt standardisierte PC-Systeme zur Anwendung kommen (SCHMIDT 1996).

Entsprechende I/O-Untis bzw. selbständige Steuerungen übernehmen die Verbindung zu den Aktoren und Sensoren. Sie sind über Koppler an das Bussystem, das vom Prozessrechner und dem zentralen Busverwalter koordiniert wird, angeschlossen (Abb. 2.2).

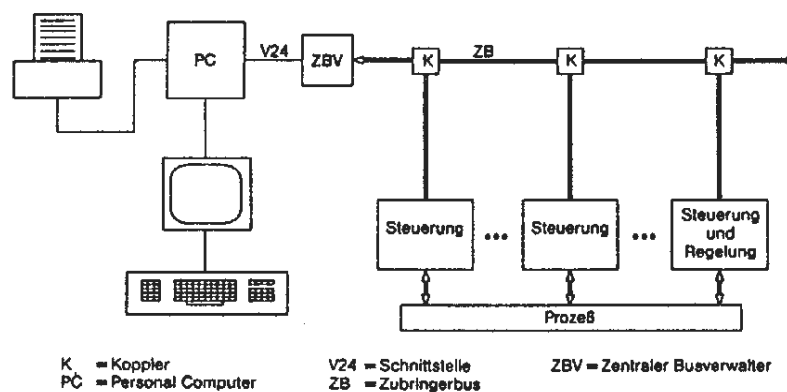


Abb. 2.2: Struktur eines PC-Leitsystems (SCHÖN 1993).

Die im Zusammenhang mit der Prozessleittechnik verwendeten Begriffe werden wie folgt definiert:

Prozessleitsystem (Leitsystem)

Das Prozessleitsystem besteht aus einem Prozessrechner, Mess- und Stellgliedern (Sensoren, Aktoren) und Peripheriegeräten zur Führung eines Prozesses. Zum Dialog mit dem Bediener werden Ein- und Ausgabegeräte angeschlossen.

Prozessrechner (Leitrechner)

Rechner, der einen Vorgang z.B. einen industriellen Prozess im Onlinebetrieb steuert. Da ein dauernder Kontakt zwischen Prozess und Rechner besteht, arbeitet er im Echtzeitverfahren. Die Prozessrechner können in herkömmlicher analoger Bauweise, Mikrocomputertechnik (Mikrokontroller, Ein- oder Mehrplatinencomputer), als speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) oder auf PC-Basis aufgebaut sein.

I/O-Unit

Peripheriegerät, das Stellbefehle an die Aktoren weitergibt und Messwerte der Sensoren aufnimmt. In der I/O-Unit erfolgt häufig die Umwandlung der analogen Signale in digitale Daten bzw. umgekehrt (A/D-Wandler bzw. D/A-Wandler). Die I/O-Units stehen über Koppler und dem Bussystem mit dem Prozessrechner in Verbindung.

Messleitung

Verbindung zur Übertragung der elektrischen Signale des Sensors zur I/O-Unit.

Schaltleitung

Verbindung von I/O-Unit zum Aktor zur Übertragung des analogen bzw. digitalen Signals zu den Aktoren.

Vorortrechner

Selbständiger Prozessrechner mit I/O-Unit, Bedien- und Anzeigefeld. Übernimmt z.B. Klima- und Bewässerungssteuerung für ein bzw. mehrere Abteile.

Bussystem

System von Leitungen zur Übertragung von Daten einzelner Systemkomponenten. Man unterscheidet zwischen parallelen (maximal 30 m) und seriellen Bussystemen (einige Kilometer). Für die Kommunikation mit den I/O-Units werden meist serielle Bussysteme verwendet.

Ringadapter (Koppler)

Baugruppe zur Übersetzung der Signale des PC-Systems (z.B. RS 232-Schnittstelle) auf das Bussystem des Prozessleitsystems.

2.2 STRUKTUR DER LEITRECHNERSYSTEME

Die im Gartenbau eingesetzten Prozessleitsysteme sind unterschiedlich strukturiert (Abb. 2.3 bis Abb. 2.5). Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die Verteilung der Intelligenz (SCHMIDT 1996).

Leitrechnerprinzip

Bei dem Leitrechnerprinzip (Abb. 2.3) sind alle Sensoren und Stellglieder mit der zentralen Eingabe-Ausgabeeinheit (I/O-Unit) verbunden. Neben einem hohen Verkabelungsaufwand sind die zum Teil langen Messleitungen als Nachteil zu nennen. Bei Anlagen mit mehr als 10 Klimaabteilen sind die Systeme in der Regel ausgelastet.

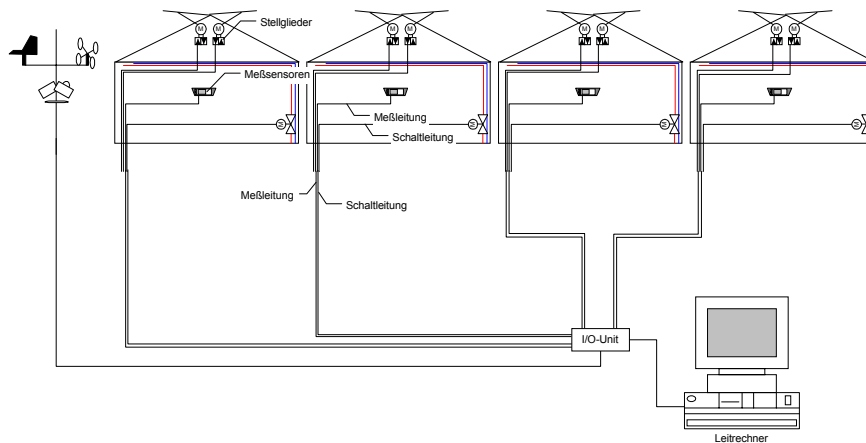


Abb. 2.3: Gewächshausautomatisierung nach dem Leitrechnerprinzip.

Vorteil des Leitrechnerprinzips ist die zentrale Datenverwaltung und Dateneingabe. Ein Datenaustausch zwischen den Funktionsgruppen ist ohne Aufwand auf Softwareebene möglich. Die Kontrollstrategien liegen zentral auf einem Rechner und können bei Änderung und Weiterentwicklung problemlos ausgewechselt werden. Auf dem Leitrechner können je nach Speichermedium große Datenmengen archiviert werden.

Prinzip der verteilten Intelligenz

Das System der verteilten Intelligenz (Abb. 2.4) wird auch als dezentrales System bezeichnet und ist das Gegenstück zum Leitrechnerprinzip.

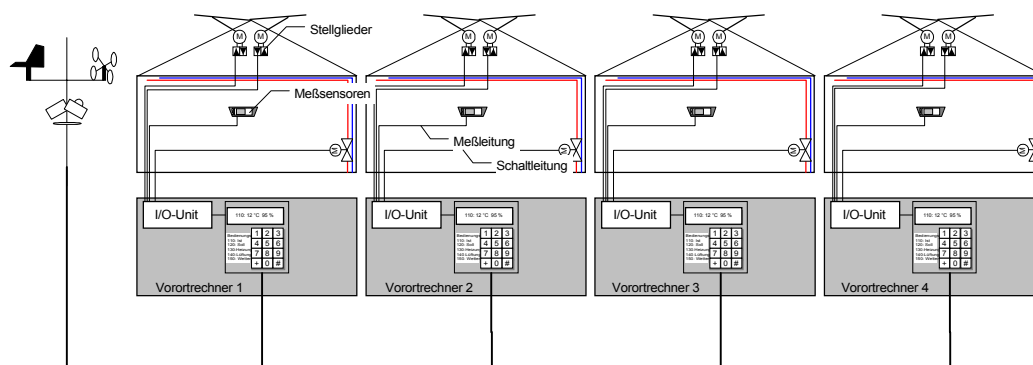


Abb. 2.4: Gewächshausautomatisierung nach dem Prinzip der „Verteilten Intelligenz“.

Eigenständige Prozessrechner (Vorortrechner) übernehmen die Klima- und Bewässerungssteuerung für die einzelnen Gewächshausabteile. Die einzelnen Vorortrechner haben integrierte I/O-Untis für eingehende Messdaten und die Ausgabe von Stellbefehlen an die Aktoren. Die Sollwerteingabe erfolgt dezentral an jedem Vorortrechner. Über entsprechende Displays ist eine eingeschränkte Datenvisualisierung möglich. Eine langfristige Datenarchivierung ist aufgrund mangelnder Speichermedien

nicht möglich. Der Verkabelungsaufwand ist minimiert. Eine spätere Erweiterung ist ohne Probleme möglich. Abgesehen von den Signalen der Wetterstation findet zwischen den einzelnen Vorortrechnern in der Regel kein Datenaustausch statt. Für die Integration neuer Regelstrategien muss jeder Vorortrechner neu konfiguriert werden.

Master/Slave Prinzip

Das Master/Slave Prinzip (Abb. 2.5) ist eine Kombination des „Leitrechnerprinzips“ und des Prinzips der „Verteilten Intelligenz“. Einzelne Vorortrechner (Slaves) übernehmen die Prozesssteuerung für ein oder mehrere Abteile. Die Vorortrechner sind über eine Busleitung mit einem zentralen Leitreechner verbunden. Der Leitreechner (Master) dient in vielen Systemen lediglich zur Datenarchivierung, Prozessvisualisierung und Führungsgrößenausgabe an die Unterstationen. Er führt keine Steuer- und Regelungsvorgänge aus.

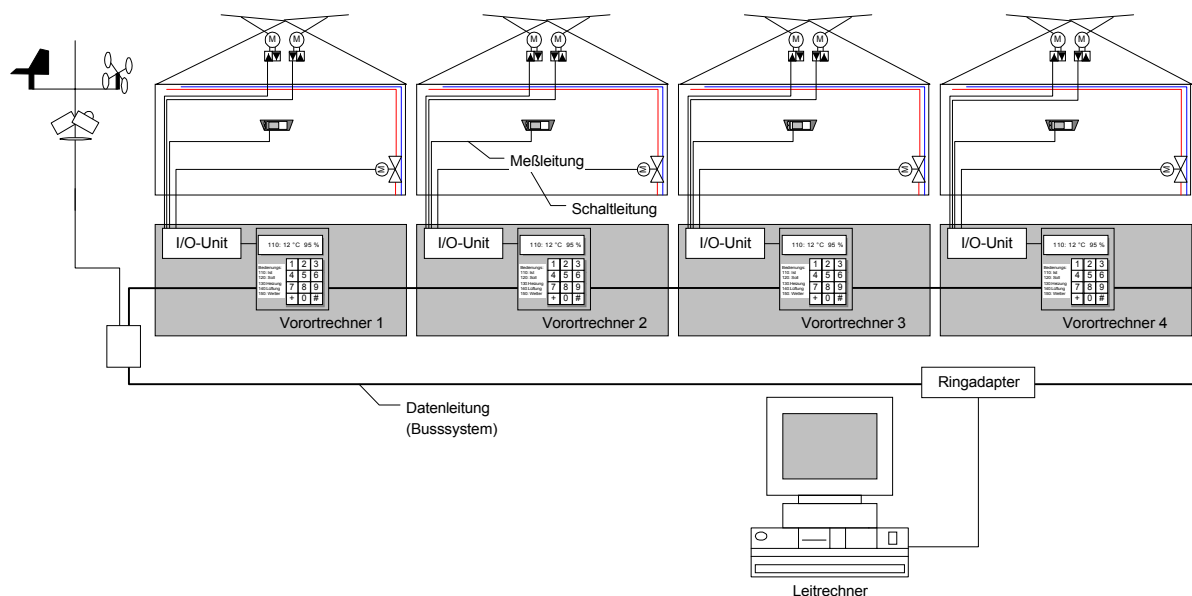


Abb. 2.5: Gewächshausautomatisierung nach dem Prinzip „Master/Slave“.

Wie bei dem System der verteilten Intelligenz muss bei einem Software-Update jeder Vorortrechner entsprechend neu konfiguriert werden.

Aufgabensplitting

Im Hinblick auf eine Verknüpfung der Klima- und Bewässerungssteuerung wird sowohl das reine Leitreechnerprinzip als auch das Prinzip der verteilten Intelligenz an Grenzen stoßen. Der Leitreechner muss durch die Verteilung der Aufgaben, ohne die Vorteile der zentralen Softwareverwaltung, der zentralen Dateneingabe und einer größtmöglichen Datenvernetzung zu verlieren, entlasten werden. Das Aufgabensplitting kann sowohl auf Hardware- als auch auf Softwareebene stattfinden (Abb. 2.6). Bei einem Hardwaresplitting übernimmt ein Messcomputer die Kommunikation mit den Stellgliedern

und den Sensoren. Bei einer vertikalen Aufgabenverteilung ist der Messcomputer mit dem Regelcomputer und dem Modul zur Datenvisualisierung und -eingabe verbunden. Bei der horizontalen Aufgabenverteilung gibt bzw. erhält der Messcomputer Information vom Klima- und Hydrocomputer (SCHMIDT 1996).

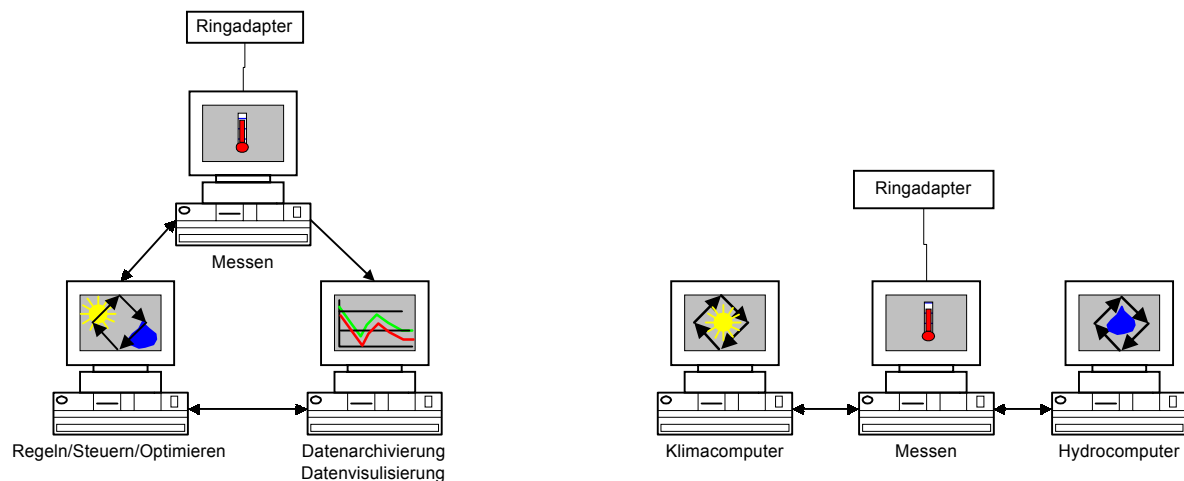


Abb. 2.6: Vertikales (links) und horizontales (rechts) Aufgabensplitting auf Hardware- oder Softwareebene (SCHMIDT 1996).

Bei einem Aufgabensplitting auf Softwareebene wird nur ein leistungsfähiger Prozessrechner (Leitrechner), der mit einem multitaskingfähigen Betriebssystem ausgerüstet ist, eingesetzt. Dadurch können mehrere Programme parallel abgearbeitet werden. Die Funktionen der einzelnen Programme können wie beim Hardwaresplitting in Abb. 2.6 dargestellt, verteilt werden.

2.3 KONTROLLSTRATEGIEN

Die Kontrollstrategie ist der Algorithmus bzw. die Gesetzmäßigkeit zur Beeinflussung einer Regelgröße. Sie ist das „Programm“, nach dem ein Produktionsprozess automatisch beeinflusst wird (SCHÖN 1993) und unterscheidet sich nach dem Grad der Rückwirkung auf den Prozess und der Struktur der Regelkreise.

Die klassischen Kontrollstrategien sind die Steuerung (Ablaufsteuerung) und die Regelung, die auch heute noch in vielen Prozessleitsystemen zur Anwendung kommen (Abb. 2.7).

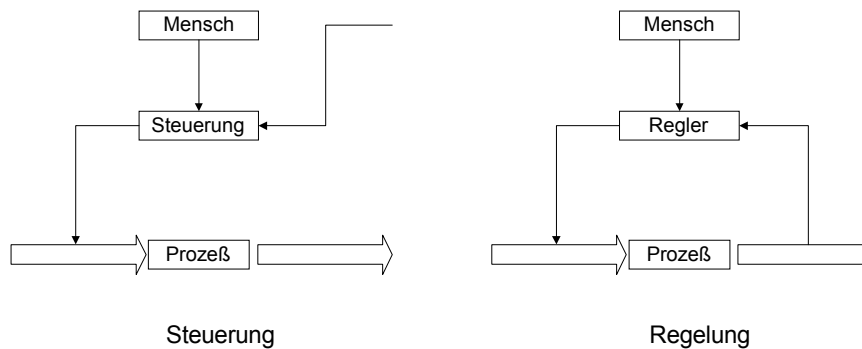


Abb. 2.7: Steuerung und Regelung als häufig eingesetzte Kontrollstrategien.

Steuerung (Ablaufsteuerung)

Nach DIN 19226 ist das Steuern - die Steuerung - ein Vorgang, bei dem eine Eingangsgröße in gesetzmäßiger Weise eine Ausgangsgröße beeinflusst. Kennzeichnend für das Steuern in seiner einfachsten Form ist der offene Wirkungsablauf. Rückwirkungen aus dem Prozess werden nicht berücksichtigt (Abb. 2.7).

Regelung

Nach DIN 19226 ist das Regeln - die Regelung - ein Vorgang bei dem die zu regelnde Größe fortlaufend erfasst und mit einer anderen vorgegebenen Größe gleicher Art (Führungsgröße) verglichen wird. Abhängig vom Ergebnis des Vergleichs erfolgt eine Angleichung der zu regelnden Größe an den vorgegebenen Wert. Regelungen können aufgrund der Rückmeldung aus dem Prozess (Abb. 2.7) Störungen und Abweichungen erkennen und automatisch ausregeln. Neben einfachen Regelkreisen, die häufig einen PI(D) Regler integriert haben, werden bei großen Regelbereichen Mehrfachregelungen bzw. Kaskadenregelungen eingesetzt. SCHMIDT bezeichnet die Regelung auch als „trial and error“ Prinzip. Stellt der Regler eine Abweichung (error) fest, wird durch eine Veränderung des Stellgliedes (trial) versucht diese Abweichung auszuregeln (SCHMIDT 1996).

Optimierung und modellgeführte Mehrgrößenregelung

Erst durch den Einsatz von Mikroprozessoren können die konventionellen Kontrollstrategien durch modellgeführte Regelstrategien (Optimierung), die physikalische und mathematische Zusammenhänge berücksichtigen, ersetzt werden. Bei der Optimierung werden nicht nur Abweichungen einzelner Messgrößen ausgeregelt, sondern ein gesamter Prozess auf das entsprechende Ziel ausgerichtet. Zur Optimierung bedarf es interner Modelle über den Prozess. Im Gartenbau kann durch den Einsatz von Modellen die bisher vorzufindende, strenge Abgrenzung der einzelnen technischen Systeme, wie Klima- und Bewässerungssteuerung durchbrochen werden. In die Modellrechnung können mehrere Messgrößen integriert und kombiniert werden. Neben Online erfassten Messgrößen müssen die Modelle unter anderem Ergebnisse aus Laboranalysen, wissenschaftlichen Untersuchungen, gärtnerischer Erfahrung und ökonomische Aspekte, wie z.B. die Marktsituation, berücksichtigen können.

2.4 TEILBEREICHE DER PROZESSAUTOMATISIERUNG

Im Gewächshausanbau werden durch entsprechende technische Einrichtungen und Regelgruppen die Wachstumsfaktoren beeinflusst (Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Regelgruppen und hauptsächlich verwendete Führungsgrößen zur Optimierung der Wachstumsfaktoren im Gewächshausanbau.

| Regelgruppen | Führungsgröße |
|----------------------------|--|
| Heizung | Temperatur, Luftfeuchte, Wind, Einstrahlung, CO ₂ -Gehalt |
| Lüftung | Temperatur, Luftfeuchte, Wind, Niederschlag, Einstrahlung, CO ₂ -Gehalt |
| Schattierung/Energieschirm | Einstrahlung, Temperatur, Luftfeuchte |
| Belichtung | Einstrahlung, Zeit |
| Düngung | Leitfähigkeit, Nährstoffgehalt (Laboranalyse), Pflanzenwachstum |
| Bewässerung | Bodenfeuchte, Einstrahlung, Zeit, Modelle |

Wenngleich viele Gewächshauscomputer die einzelnen Regelgruppen in einem Prozessleitsystem integriert haben, so laufen die Teilprozesse oft parallel ohne gegenseitigen Datenaustausch ab. Biologische und physikalische Zusammenhänge und Wechselwirkungen werden nicht berücksichtigt. Die Abstimmung der einzelnen „Regler“ muss vom Anwender vorgenommen werden (Abb. 2.8).

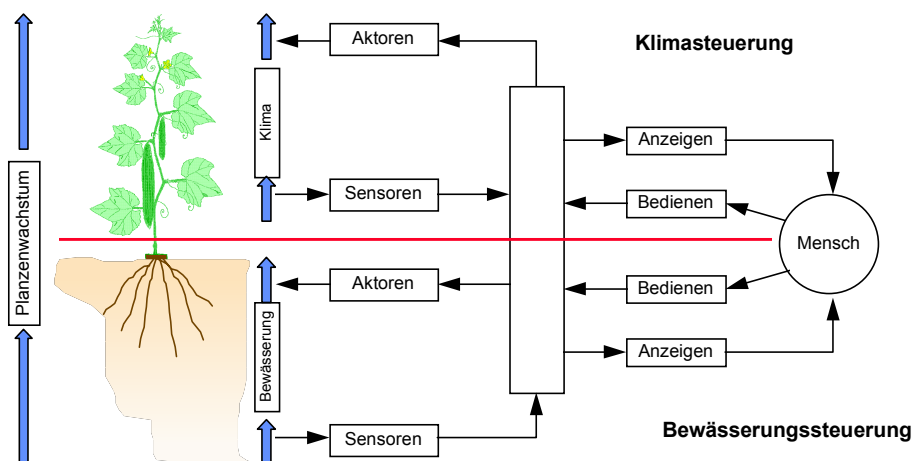


Abb. 2.8: Prozessleitsystem ohne logische Verknüpfung der Klima- und Bewässerungssteuerung.

2.4.1 KLIMASTEUERUNG

Im Vergleich zur Bewässerungssteuerung ist die Automatisierung der Klimasteuerung auf einem höheren Entwicklungsstand. Ursache dafür ist unter anderem der hohe Anteil der Energiekosten an den Gesamtproduktionskosten.

Neue Regelstrategien (z.B. Diff-, Cool Morning), die das Pflanzenwachstum beeinflussen, zwingen zur Modernisierung der Prozesssteuerung. Analoge Einzelregler können auf diese Strategien nicht ohne großen Aufwand abgestimmt werden (BAKKER et al. 1995).

Im Bereich der Klimasteuerung finden die derzeitigen Entwicklungen in der Beschreibung neuer Ziel-funktionen sowie in der Verbesserung der Bedien- und Benutzeroberfläche statt (SCHMIDT 1996). Die meisten Systeme haben die klassischen Schemata wie z.B. eine Ablaufsteuerung oder eine Regelung (PID-Regler) integriert (Abb. 2.7). Adaptierende Regelungen bzw. Steuerungen und Modellrechnungen werden meist nur zu Versuchszwecken eingesetzt.

Entwicklungen wie das Plantputer Prozessleitsystem (SCHMIDT 1996) integrieren pflanzliche Signale um das physiologische Verhalten, wie z.B. die Transpiration der Pflanze und die Blatttemperatur zu optimieren. Die bisher getrennten Regelkreise für Heizung, Lüftung, Schattierung und Bewässerung werden zu einer Mehrgrößenregelung ausgebaut. Als zentrale Regelgröße wird die Bestandtemperatur angesehen. Da die Bestandtemperatur messtechnisch schwierig zu erfassen ist, werden thermodynamische Modelle benutzt (SCHMIDT 1992). Modellgeführte Regelstrategien, die Störgrößen wie z.B. die Einstrahlung direkt verarbeiten und durch entsprechende Optimierungsprogramme an die entsprechenden Bedingungen automatisch adaptiert werden führen zu einer sehr ruhigen, schwingungsfreien und energiesparenden Regelung (SCHMIDT 1997). Durch die Integration der Blatttemperatur kann Heizenergie eingespart, der Wasser- und Nährstoffverbrauch optimiert und der Ertrag in Quantität und Qualität verbessert werden (SCHMIDT 1992).

Durch modellgeführte Regelstrategien können die vorzugebenden Regelparameter (bis zu 200 pro Klimaabteil) reduziert werden (TANTAU 1990).

Die Messwerte der eingesetzten Sensoren sind häufig mit einem hohen Messfehler behaftet. STRAUCH unterscheidet grobe Messfehler, die durch einen Gerätedefekt auftreten können, ungeeignete Messgeräte, falschen Einsatz(ort) der Messfühler und Bedienungsfehler (STRAUCH 1992). Eine notwendige Wartung der Sensoren wird häufig vernachlässigt (SCHMIDT 1997).

Hinzu kommt, dass bedingt durch die Anordnung der Heizsysteme, Gradienten bei der Wärmeverteilung in den Gewächshäusern auftreten (TANTAU 1995b).

2.4.2 BEWÄSSERUNGSSTEUERUNG

Bei der Analyse der Bewässerungssteuerung ist die Vielfalt der Anbaumethoden zu berücksichtigen (Abb. 2.9).

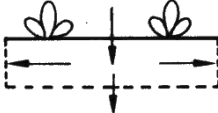
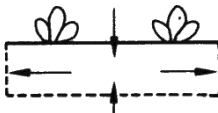
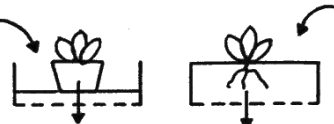
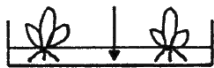
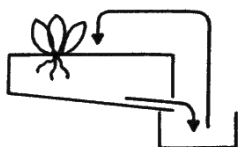
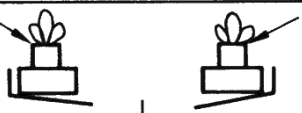
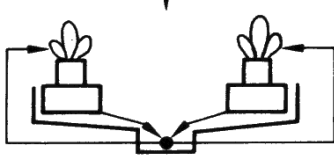
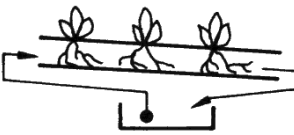
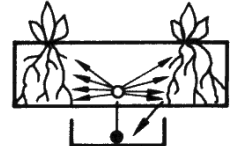
| Bezeichnung | | Prinzip | Anwendung |
|-----------------------------|---|--|---|
| Bodenkultur | offen |  | Gemüse und Schnittblumen im Freiland und unter Glas |
| | begrenzt geschlossen |  | |
| gepufferte Substratkultur | offen |  | Topfpflanzen auf Sandanstau, offene Bankbeete |
| | geschlossen |  | Dünnschichtkultur |
| | – ohne Recycling der Überschußlösung – mit Recycling der Überschußlösung |  | |
| ungepufferte Substratkultur | offen |  | Steinwollkultur |
| | geschlossen |  | Steinwolle, Blähton |
| Nährlösungskultur | Wurzel in |  | NFT (Nährfilmtechnik) |
| | – ständigem Nährlösungskontakt – nicht ständigem Nährlösungskontakt |  | Aeroponik (Wurzelsprühkultur) |

Abb. 2.9: Einteilung der Anbaumethoden (STORCK 1994).

Aus regelungstechnischer Sicht sind Systeme mit und ohne Überschusswasser zu unterscheiden (Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Regelungstechnische Besonderheiten der Anbauverfahren mit und ohne Drainwasser.

| | Systeme mit Drainwasser | Systeme ohne Drainwasser |
|--|---|--|
| Drainwasser | <ul style="list-style-type: none"> - Auffangen - Analyse und Aufbereitung - Steuerung der Drainwassermenge | <ul style="list-style-type: none"> - Überschusswasser muss verhindert werden |
| Führungsgrößen zur Bewässerungssteuerung | <ul style="list-style-type: none"> - Einstrahlung - Zeit - Modelle - Überschussmenge | <ul style="list-style-type: none"> - Bodenfeuchte im Wurzelbereich - Einstrahlung - Bodenfeuchte unterhalb der Wurzelzone |
| Düngekonzept | <ul style="list-style-type: none"> - Konzentrationskonzept - EC- und pH-abhängige Regelung - Einzelnährstoffdünger - A/B-Bag-System | <ul style="list-style-type: none"> - Mengenkonzent - Konzentrationskonzept - Mehrnährstoffdünger - Einzelnährstoffdünger |

Die in den verschiedenen Kulturverfahren eingesetzten Wasserverteilsysteme unterscheiden sich in der Benetzung der Bodenoberfläche. Die Algorithmen zur Automatisierung der Bewässerung sind entsprechend anzupassen (Tab. 2.3).

Tab. 2.3: Regelungstechnische Anforderungen der Wasserverteilsysteme.

| Verteilsystem | Bei der Automatisierung zu berücksichtigen |
|------------------|---|
| Sprühdüsen | <p>Aufgrund des hohen Wasserbedarfs können nicht mehrere Stränge parallel eingeschaltet werden (Folgeschaltung).</p> <p>Durch die Befeuchtung der Blätter entsteht ein erhöhtes Risiko für Pilzkrankheiten (Bewässerung nur wenn das Laub bis Sonnenuntergang wieder abtrocknen kann).</p> <p>Werden auch zur Luftbefeuchtung eingesetzt.</p> |
| Tropfbewässerung | <p>Lange Bewässerungsdauer, da Ausbringmenge pro Zeiteinheit gering ist.</p> <p>Hohe Niederschlagsdichte pro Flächeneinheit in den befeuchteten Bereichen.</p> <p>Pflanzen werden durch das Tropfsystem nicht nass.</p> <p>Über die Tropfbewässerung kann auch die Düngung ausgebracht werden.</p> |
| Gießwagen | <p>Der Gießwagen muss wieder in Ausgangsposition zurückgeführt werden.</p> <p>Die Düngung ist nur bei kompletten Überfahrten möglich.</p> <p>Die Pflanzen werden je nach Verteilsystem (Düsen, Schleppschläuche) nass.</p> |
| Ebbe-Flut | <p>Vor einem Bewässerungsvorgang müssen die Nährlösungsbecken befüllt werden.</p> <p>Das Überschusswasser muss in das entsprechende Becken zurückgeführt werden.</p> |

Aufgrund der geringeren Spezialisierung sind in vielen deutschen Gewächshausbetrieben häufig in einem Betrieb mehrere Anbau- und Bewässerungsverfahren vorzufinden.

Als mögliche Führungsgrößen für die Bewässerungssteuerung können der Wasserzustand der Pflanze, die Bodenfeuchte, Klimafaktoren, die Zeit sowie die Sinnesempfindungen des Kultivateurs und andere (Tab. 2.4) eingesetzt werden.

Tab. 2.4: Möglichkeiten zur Steuerung und Regelung der Bewässerung (PASCHOLD 1994).

| Wasserzustand der Pflanze | Bodenfeuchte | Klimafaktoren | Sonstige |
|--|---|--|--|
| Turgor Spaltöffnungen Saftstrom Transpiration Stammdurchmesser | Wassergehalt - Gravimetrie - Kapazitätsmessung - Neutronensonde - TDR Sonde - Peltier Element - Leitfähigkeit Wasserverfügbarkeit - Tensiometrie ¹⁾ - Gipsblock ¹⁾ | Einstrahlung ¹⁾ Lysimeter (Verdunstung) Feuchtedefizit Feuchtedifferenz Modellrechnungen | Sinnesempfindung u. Erfahrung (Grüner Dau-men) ¹⁾ Zeitsteuerung ¹⁾ Spatenprobe |

¹⁾ In der Praxis häufig eingesetzt

Im Bereich der Bodenfeuchtemessung werden laufend neue Sensoren vorgestellt. Inwieweit sich diese bei den verschiedenen Bodenarten und Kulturmethode eignen ist im Einzelnen zu prüfen. Pflanzliche Signale wie z.B. Transpiration, Saftstrommessung, Stammdicke u.a. werden bisher nur in wissenschaftlichen Untersuchungen eingesetzt (ROSE and ROSE 1995).

Modellrechnungen zur Bewässerungssteuerung werden von STANGHELLINI in BAKKER et al. HEIßNER und SCHMIDT beschrieben (Kap 4.5.3) und sind teilweise nur für bestimmte Kulturen und Kulturmethode untersucht (BAKKER et al. 1995); (HEIßNER 1997); (SCHMIDT 1999). Bei der sog. „Geisenheimer Methode“ wird für die Bewässerung von Freilandkulturen die klimatische Wasserbilanz und die Pflanzenentwicklung berücksichtigt (PASCHOLD 1994).

Alle Verfahren sind mit Vor- und Nachteilen verbunden und müssen teilweise durch manuelle Eingriffe in Form von Sollwertvorgaben und -änderungen dem Kulturabschnitt angepasst werden (Tab. 2.5). Der Kultivateur ist gezwungen, vorsichtshalber immer reichlich zu bewässern und am Steuergerät den Schwellenwert nachzustellen. Teilweise sind tägliche Korrekturen notwendig (MACKROTH et al. 1990).

Tab. 2.5: In der Praxis häufig eingesetzte Methoden zur Bewässerungssteuerung und die Notwendigkeit manueller Eingriffe.

| Führungsgröße | Beschreibung und notwendige manuelle Eingriffe |
|-----------------------------------|--|
| Gärtnerische Erfahrung | Der Kultivateur bestimmt aufgrund seiner Erfahrung ob ein Bewässerungsvorgang durchgeführt werden soll. In der lichtarmen Jahreszeit (Herbst, Winter, Frühjahr) wird dieses Verfahren einer automatischen Steuerung vorgezogen. Im Sommer wird die Handsteuerung aufgrund von Arbeitsspitzen häufig zu spät ausgelöst. Manuelle Eingriffe: Täglich (mehrmalige) Kontrolle der Pflanzen um Bewässerungszeitpunkt und Bewässerungsdauer vorzugeben. |
| Zeit | Die Gießabstände werden aufgrund vorhandener Erfahrungswerte je nach Kulturfortschritt und Jahreszeit eingestellt. Manuelle Eingriffe: Gießabstände sind der Witterung, der Pflanzenart und –größe anzupassen. |
| Einstrahlungssumme | Die Einstrahlung wird über einen außerhalb des Gewächshauses an der Wetterstation angebrachten Einstrahlungssensor gemessen und über die Zeit integriert. Bei Erreichen eines vorgegebenen Sollwertes wird ein Bewässerungsimpuls ausgelöst. Der Einstrahlungsgrenzwert wird je nach Kulturfortschritt und Jahreszeit vom Kultivateur angepasst. Manuelle Eingriffe: Einstrahlungssummen sind der Witterung, der Klimaführung und der Pflanzenart und -größe anzupassen. |
| Bodenfeuchte (Tensiometer) | Die Wasserverfügbarkeit im Boden wird über ein Tensiometer oder einen Tensioschalter mit fest eingestelltem Schalterpunkt, der zu Kulturbeginn festgelegt wird, gemessen. Bei Erreichen eines Sollwertes (60, 90, 120 - 800 hPa) wird ein Bewässerungsimpuls ausgelöst. Manuelle Eingriffe: Während der Kultur meist keine Eingriffe notwendig |

Die Anforderungen an die Bewässerungssteuerung sind heute nicht nur auf eine optimale Wasserversorgung der Pflanzen ausgerichtet. Bei einem Anbau im gewachsenem Boden ist eine Sickerwasserbildung und damit evt. verbundener Stoffaustrag in das Grundwasser zu verhindern (BECK et al. 1995). Gesetzliche Auflagen, z.B. in Wasserschutzgebieten in Baden-Württemberg (SCHALVO 1991), die Düngemittelverordnung oder selbst auferlegte Verbands- und Produktionsrichtlinien (z.B. integrierte Produktion) fordern einen umweltschonenden Einsatz der Produktionsmittel. Die zunehmende Wasserknappheit, die durchaus auch in manchen Gebieten Deutschlands z.B. hessisches Ried, von Bedeutung ist, fordert einen effizienten Wassereinsatz.

Aufgrund der beim Einsatz von Pflanzenschutzmitteln auftretenden Resistenzen sowie fehlenden Zulassungen für Pestizide gewinnt die Steuerungs- und Regelungstechnik zur Schaffung optimaler Wachstumsbedingungen zunehmend an Bedeutung (HENDRICKS 1997); (SCHRAGE 1997). Durch eine suboptimale Wasserversorgung kann das Längenwachstum bei gleichbleibender Qualität reduziert werden (HALLUARD et al. 1997). Auch die unterschiedlichen Produktionsziele in den einzelnen Sparten des Gartenbaus stellen unterschiedliche Anforderungen an die Bewässerungssteuerung. Im Zierpflanzenbau ist z.B. die Qualität, der optische Eindruck einer Pflanze, ein kompakter Wuchs bei einer kurzen Kulturzeit, gefordert. Im Gemüsebau wird auf hohe Erträge, hohe Zuwachsraten und auf die innere Qualität, wie z.B. ein geringer Nitratgehalt, großer Wert gelegt.

Die Bewässerungssteuerung beschränkt sich bisher hauptsächlich auf eine ausreichende Wasserversorgung im Wurzelbereich. Ein aktiver Eingriff in die Klimaregelung zur Schaffung günstiger Transpirations- und Photosynthesebedingungen wird bisher nicht vorgenommen. In die Bewässerungssteuerung und damit in die Prozessleitsysteme sind neben pflanzenbaulichen, ökologische, ökonomische und betriebsspezifischen Überlegungen zu integrieren (Tab. 2.6).

Tab. 2.6: Anforderungen an die Bewässerungssteuerung.

| | |
|--------------------|--|
| Pflanzenbaulich | Flexible Führungsstrategien Ausreichende Wasserversorgung im Wurzelbereich Optimale Transpirationsbedingungen |
| Ökonomisch | Hoher Ertrag bei minimierten Aufwand Kosten-Nutzenverhältnis von Investitionen |
| Ökologisch | Keine Wasserversickerung und damit auch keine Nährstoffauswaschung Einsparung von knappen Recourcen Pestizideinsparende Wachstumsbedingungen schaffen |
| Betriebsspezifisch | Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an: <ul style="list-style-type: none"> - technische Einrichtungen - Produktionsziele - Erweiterbarkeit |

2.5 EDV-GEFÜHRTE BETRIEBSSTEUERUNG

HASHIMOTO überträgt den, in der chemischen Industrie verwendeten, Begriff CIM (computer integrated manufacture) in den Gartenbau (HASHIMOTO 1993). Der Prozessrechner (CPC computer for process control) steht über ein Netzwerk mit einem zentralen Computer in Verbindung. Dieser ist für die Optimierung des Prozesses u.a. mit Experten-, Diagnose- und Informationssystemen ausgestattet und liefert Daten an den Prozessrechner.

VAN STRATEN fordert eine neue Generation von Klimacomputern (KRUSCHE 1995). Diese sollen nicht nur die vorgegebenen Sollwerte optimal ausregeln sondern auch den Gewinn des Produzenten maximieren.

SCHÖN beschreibt die EDV-geführte Betriebsführung als vernetztes Informationssystem (SCHÖN 1993). Dazu gehören Wetterstation, Bordcomputer und Prozessrechner, innerbetriebliche (Buchführung) und überbetriebliche Datenbanken und Informationsquellen (Pflanzenschutz- und Düngemittelverzeichnis). Die Prozesssteuerung muss die für das Erreichen des Produktionszieles notwendigen Maßnahmen einleiten und ausführen.

TANTAU gliedert die Klimaregelung in ein hierarchisches System ein (Abb. 2.10) (TANTAU 1990). Die oberste Ebene ist die Kulturplanung, für die bereits umfangreiche Software zur Verfügung steht. Die unterste Ebene ist die Prozesssteuerung, die durch die Klimacomputer abgedeckt wird. Die mittlere Ebene (Optimierungsebene) stellt anhand der Vorgaben der oberen Ebene und Informationen aus der unteren Ebene die Sollwerte für die Prozesssteuerung zur Verfügung.

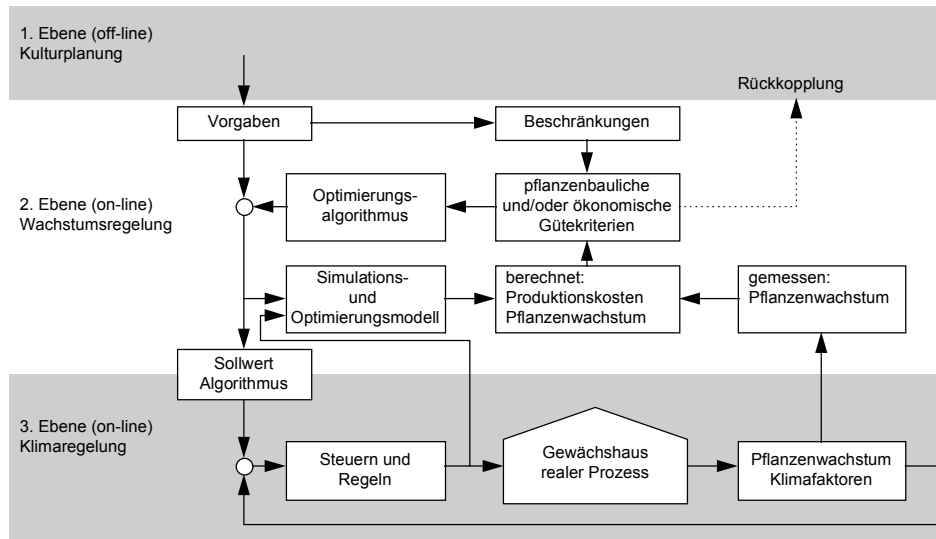


Abb. 2.10: Die Klimaregelung als hierarchisches System mit drei Ebenen (TANTAU 1990).

3 DER WASSERHAUSHALT IN BODEN, PFLANZE UND ATMOSPHERE

Die Wasseraufnahme, Wasserbewegung und Transpiration wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst (Abb. 3.1). Wesentliche Triebkraft für einen Wassertransport sind Wasserpotentialdifferenzen zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre. Im Soil-Plant-Atmosphere-Continuum [SPAC] (PHILIPP 1966) muss das Wasser Diffusionswiderstände überwinden. Ein feuchter Boden hat ein höheres Potential als die Pflanze und die Atmosphäre (Abb. 3.1). Die Saugkraft von Pflanzenzellen kann maximal die Höhe des osmotischen Potentials der Vacuolenfüllung (-10 bis -100 bar) erreichen.

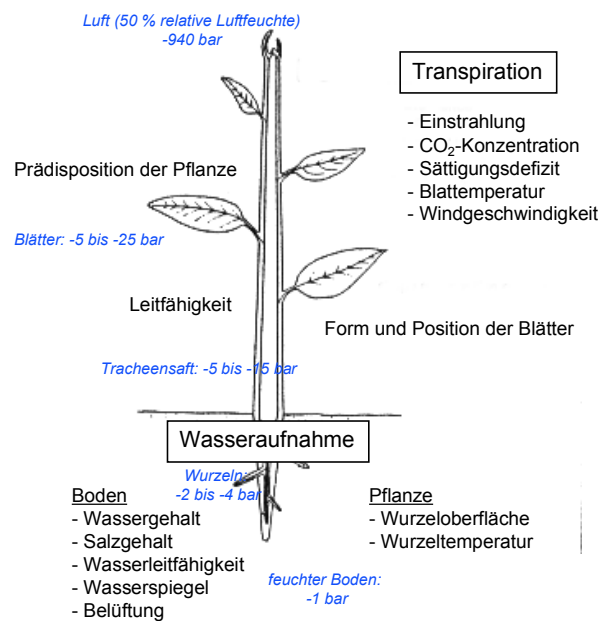
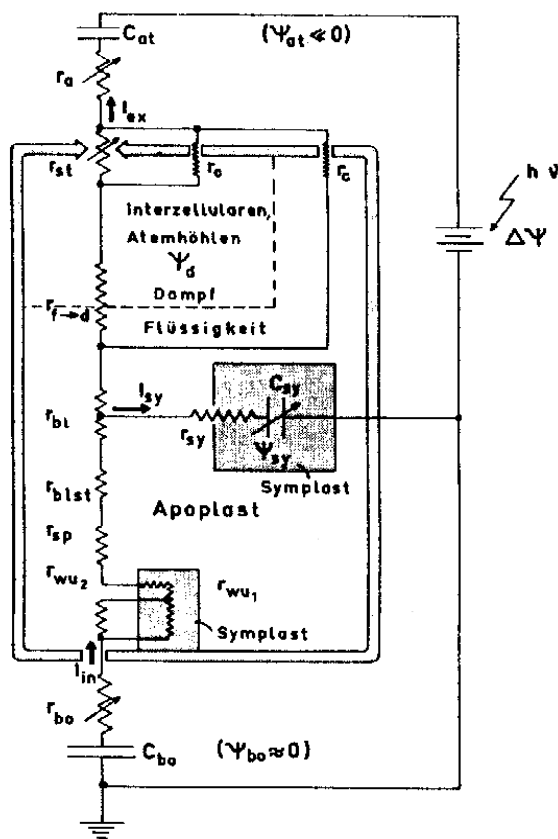


Abb. 3.1: Wasserpotentiale und Einflussfaktoren auf Wasseraufnahme, Wassertransport und Transpiration im SPAC (FRICKE und KRUG 1997); (MOHR und SCHOPFER 1992).

3.1 DAS POTENTIALKONZEPT

Für die Beschreibung des energetischen Zustandes offener chemischer Systeme wird das chemische Potential verwendet. Unter einem chemischen Potential versteht man die freie Enthalpie pro Mol einer bestimmten chemischen Komponente in einem Gemisch mehrerer solcher Komponenten. Das Gesamtpotential wird in eine Reihe von Einzelpotentialen zerlegt, welche in ihrer Summe die freie Enthalpie dieser speziellen Teilchen ausmachen. Übertragen auf das Wasser im Boden und der Luft setzt sich das Gesamtpotential aus dem Konzentrationspotential, dem Druckpotential, dem Ladungspotential und Gravitationspotential zusammen.

Die Wasserbewegung im SPAC wird häufig als elektrisches Analogiemodell beschrieben. Dabei sind Potentiale (Ψ_x), Kapazitäten (c_x), Widerstände (r_x) und Ströme (I_x) zu berücksichtigen (MOHR und SCHOPFER 1992) (Abb. 3.2).



bo=Boden
sy=Symplasten
at= Atmosphäre

in = Aufnahmestrom
sy= Wasserstrom in den Symplasten
ex = Wasserdampfstrom in Atmosphäre

Schräge Pfeile sind variable Widerstände

Im Symplasten
wu1= Wurzelcortex
sy = Plasmamembran

wu2 = in der Wurzel

sp = Spross
blst = Blattstiel
bl = Blatt
rf-d=flüssig-dampfförmig
st=Stomata

c=Cuticula
Äußere
bo = Boden
a = gegen Transpirationsstrom

bo = Wasserpotential im Boden
sy = im Symplasten
d = Interzellularen
at = Atmosphäre

Abb. 3.2: Analogiemodell für den Wassertransport in der Pflanze (MOHR und SCHOPFER 1992).

3.2 DAS WASSER IM BODEN

Der Boden bzw. das Substrat dient der Pflanze als Standort. Aufgrund seines Porenraumes kann der Boden das Wasser speichern und leiten. Ist die Wassersättigung erreicht kommt es bei einer weiteren Wasserzufuhr zu einer Wasserbewegung und damit verbunden eventuell zu einer Nährstoffverlagerung in tiefere Bodenschichten. Bei einer Übernässung kann es aufgrund von Sauerstoffmangel im Wurzelbereich zu Ertragseinbußen kommen (BIERHUIZEN und VOS 1959).

3.2.1 EINTEILUNG DES BODENWASSERS

Die Einteilung des Bodenwassers in Gravitationswasser, pflanzenverfügbares Wasser und Totwasser wird als statische Betrachtungsweise bezeichnet. Die einzelnen Kenngrößen sind von der Bodenart abhängig (Abb. 3.3).

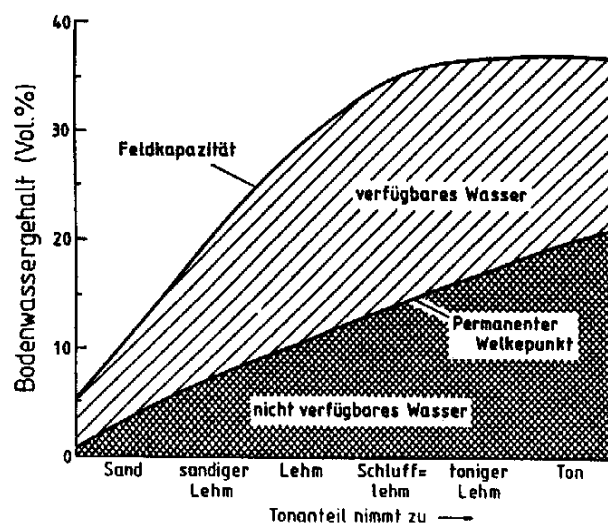


Abb. 3.3: Wassergehalte in Abhängigkeit der Bodenart (EHLERS 1996).

Die Wassermenge, die der Boden bei Wassersättigung nach zwei Tagen noch gegen die Schwerkraft halten kann, nennt man Feldkapazität. Ist das Wasser so stark an die Bodenteilchen gebunden, dass die Pflanze kein Wasser mehr aufnehmen kann, ist der permanente Welkepunkt erreicht (bei krautigen Pflanzen, z.B. der Sonnenblume bei -15 bar) (MOHR und SCHOPFER 1992).

3.2.2 DAS WASSERPOTENTIAL DES BODENS

Die Betrachtung des Bodenwasserpotentials wird auch als dynamischen Betrachtungsweise bezeichnet. Sie kann auf alle Bodenarten angewendet werden und gibt Aufschluss über die Wasserbewegung bzw. die Wasserverfügbarkeit.

Das Gesamtwasserpotential (Ψ_G) des Bodens setzt sich aus dem Matrixpotential (Ψ_M), Gravitationspotential (Ψ_Z), osmotischem Potential (Ψ_O) und dem Druckpotential (Ψ_P) zusammen.

$$\Psi_G = \Psi_M + \Psi_Z + \Psi_O + \Psi_P \quad F (3.1)$$

Das Matrixpotential ist in der Adsorption von Wassermolekülen durch die Oberfläche der anorganischen und organischen Bodenteilchen, der Bodenmatrix begründet. Es wird auch als Wasserspannung oder Tension bezeichnet. Das durch gelöste Ionen verursachte osmotische Potential wird, da im Boden keine semipermeable Wand vorhanden ist, bei der Betrachtung der Wasserbewegung im Boden nicht berücksichtigt. Für die Wasseraufnahme durch die Pflanze kann es jedoch bei erhöhten Salzgehalten im Boden durchaus eine Rolle spielen. Das Druckpotential, das kurzfristig durch eine von außen einwirkende Kraft (Bodenbearbeitung) auftreten kann, wird für die Betrachtung der Wasserbewegung ebenfalls außer acht gelassen (HARTGE 1978).

Für das Wasserpotential im Boden gilt:

$$\Psi_G = \Psi_M + \Psi_Z \quad F (3.2)$$

Zwischen zwei voneinander entfernten Punkten (Abstand $=\Delta z$) entsteht nur dann eine Bewegung (Flux (q_w)) wenn, eine Wasserpotentialdifferenz ($\Delta\Psi_G$) besteht (EHLERS 1996).

Dieser Zusammenhang wird durch die Darcy-Gleichung beschrieben:

$$q_w = K \cdot \frac{\Delta\Psi_G}{\Delta z} \quad F (3.3)$$

3.2.3 WASSERBEWEGUNG IM BODEN

Die Bodenphysik unterscheidet die gesättigte und die ungesättigte Wasserbewegung. Mit zunehmender Austrocknung wird die verbleibende Wasserfüllung in immer kleinere Poren mit immer geringerem Porendurchmesser verschoben. Der wasserleitende Querschnitt im Boden und die hydraulische Leitfähigkeit nehmen ab. Zur Bestimmung der tatsächlich geleiteten Wassermenge wird deshalb die erweiterte Darcy-Gleichung verwendet (EHLERS 1996):

$$q_w = K(\Psi) \cdot \frac{\Delta \Psi_G}{\Delta z} \quad F (3.4)$$

Das Gravitationspotential (Ψ_Z) hat ein positives Vorzeichen. Es beträgt an der Wasseroberfläche null und nimmt mit steigender Höhe zu (Abb. 3.4). Das Matrixpotential (Ψ_M) wirkt dem Gravitationspotential entgegen, hat ein negatives Vorzeichen und nimmt mit steigender Trockenheit ab. In einer mit Wasser gesättigten Bodensäule ist das Gesamtpotential (Ψ_G) = 0. Es findet keine Wasserbewegung statt (Abb. 3.4).

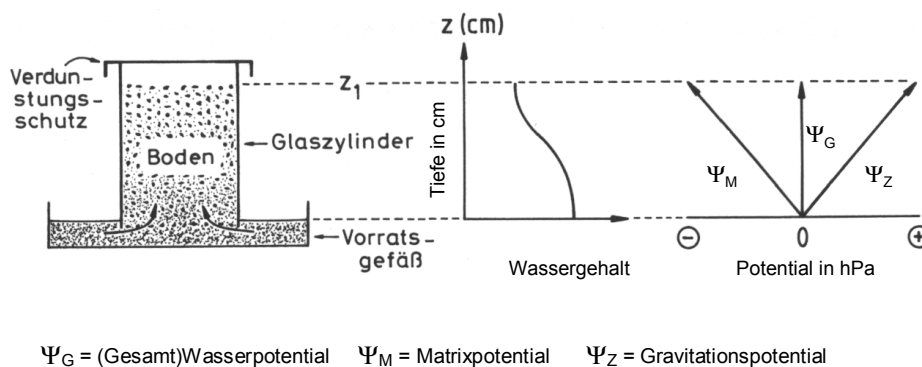


Abb. 3.4: Die Potentialverteilung in einer wassergesättigten Bodensäule (EHLERS 1996).

Für die weitere Betrachtung des Matrixpotentials wird das negative Vorzeichen weggelassen.

Da die Lage der Grundwasseroberfläche meist nicht bekannt ist, kann das Gesamtpotential nicht berechnet werden. Zur Bestimmung der Wasserbewegung wird deshalb der hydraulische Gradient ($\text{Grad}(\Psi_G)$), der aus dem Matrixpotential ($\Psi_{M,z2}$; $\Psi_{M,z1}$) an 2 verschieden tief liegenden Messpunkten (z_2 ; z_1) berechnet wird, verwendet:

$$\text{Grad}(\Psi_G) = \frac{\Psi_{M,z2} - \Psi_{M,z1}}{z_2 - z_1} + 1 \quad F (3.5)$$

Ist der hydraulische Gradient Null ($\text{Grad}(\Psi_G) = 0$) herrscht Gleichgewicht, es findet keine Wasserbewegung statt. Ist er kleiner Null ($\text{Grad}(\Psi_G) < 0$) findet ein Wasseraufstieg statt, ist er größer Null ($\text{Grad}(\Psi_G) > 0$) eine Wasserversickerung (Abb. 3.5).

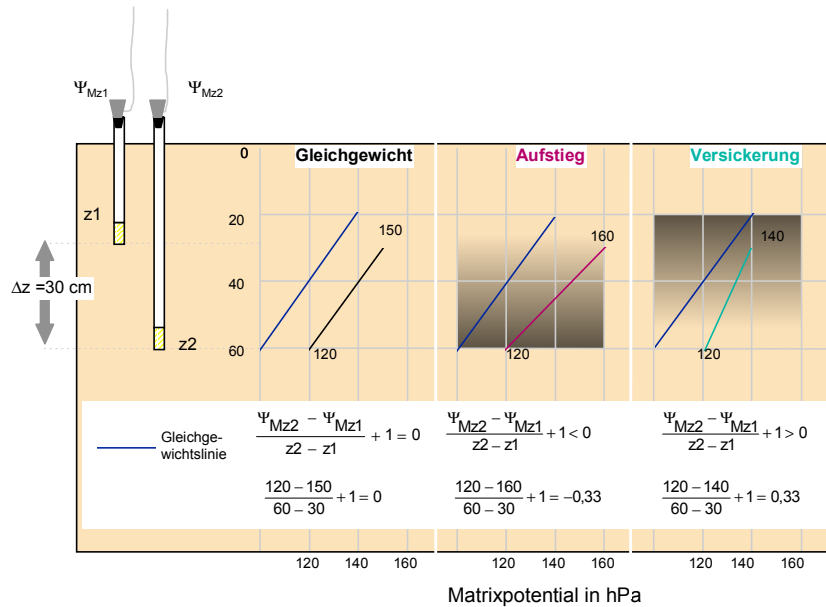


Abb. 3.5: Beurteilung der Wasserbewegung mit Hilfe des hydraulischen Gradienten.

Durch einen starken Wasserentzug von Pflanzen und kontrollierten Bewässerungsbedingungen kann sich eine sog. Trockenzone unterhalb der durchwurzelten Bodenschicht ausbilden (Abb. 3.6).

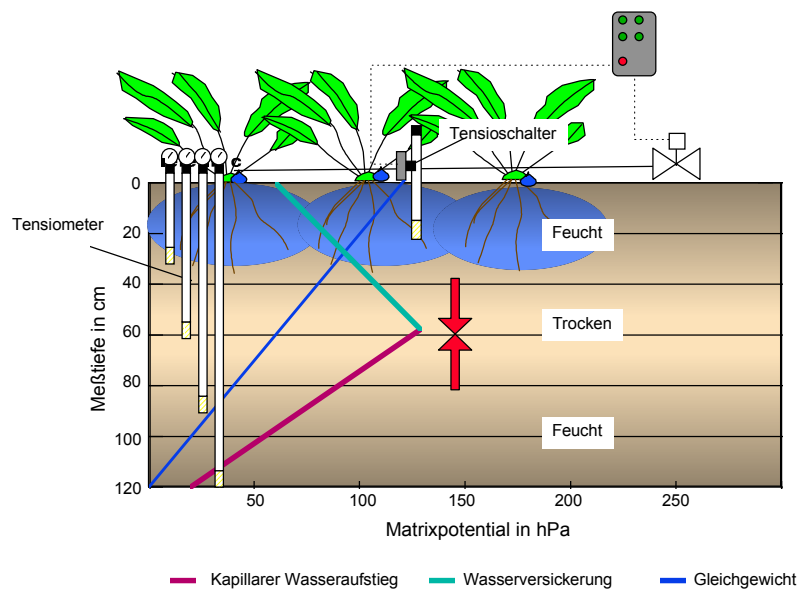


Abb. 3.6: Optimale Matrixpotentialverhältnisse zur Verhinderung der Wasserversickerung bei einer tensioschaltergesteuerten Bewässerung (BECK et al. 1995).

Unterhalb der Trockenzone findet Wasseraufstieg statt. Eine Nährstoffverlagerung in tiefere Bodenschichten wird dadurch verhindert. Die Trockenzone kann durch den Einsatz von Tensiometern beobachtet werden.

3.2.4 WASSERVERTEILUNG UNTER EINER TROPFSTELLE

Die Tropfbewässerung wird unter anderem aufgrund der positiven Beeinflussung des Gewächshausklimas bei dem Anbau im gewachsenem Boden häufig eingesetzt. Die Wasserausbreitung unter einer Tropfstelle verhält sich je nach Bodenart, Bewässerungsmenge und Niederschlagsdichte unterschiedlich (Abb. 3.7) (DASBERG und BRESLER 1985); (GOLDBERG et al. 1976).

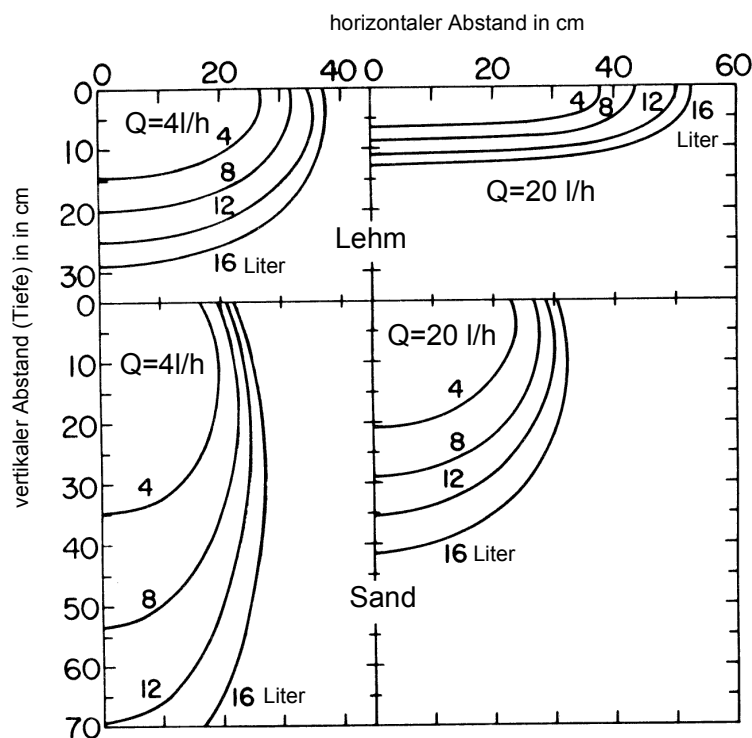


Abb. 3.7: Wassergesättigte Bodenzonen unterhalb einer Tropfstelle bei verschiedenen Ausbringungsmengen (4-16 Liter) Niederschlagsdichte (Q) und Bodenarten (DASBERG und BRESLER 1985).

Neben materialbedingter Fertigungstoleranzen, die je nach Tropfschlauch und Gefälle unterschiedlich sein können (WILHELM und MEYER 1992) ergeben sich durch das Auslaufen des Bewässerungssystems nach Abschluss eines Gießvorganges Ungleichmäßigkeiten in der Wasserverteilung (HÖFERT et al. 1994).

3.2.5 METHODEN ZUR KONTINUIERLICHEN MESSUNG DES BODENWASSERS

Zur Charakterisierung des Bodenwassers kann der Wassergehalt oder die Wasserverfügbarkeit bzw. die Kraft, mit der das Wasser gebunden ist (Matrixpotential), gemessen werden. Im Gegensatz zum Wassergehalt kann das Matrixpotential unabhängig von den Bodeneigenschaften miteinander verglichen und daraus die Wasserbewegung abgeleitet werden. Von LÜHR und KLEISINGER wird ein Prüfverfahren zur Kalibrierung der Messwerte wartungsarmer Sensoren auf die Tensiometer-Saugspannung vorgestellt (LÜHR und KLEISINGER 1998).

Die wichtigsten Methoden zur Messung des Bodenwassers werden nachfolgend beschrieben.

3.2.5.1 TDR-METHODE

Das Verfahren der Time Domain Reflectometry (TDR) ist eine indirekte Methode zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes. Dieser Methode liegt die Tatsache zugrunde, dass die Laufzeit elektromagnetischer Wellen vom Wassergehalt des Bodens abhängig ist. Anhand der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen und der Länge der eingebrachten Messstäbe wird die Dielektrizitätszahl bestimmt. Aus der Dielektrizitätszahl, der Temperatur sowie der geschätzten Porosität der Stoffmatrix kann der Wassergehalt berechnet werden (KELLER 1997).

Das EQUI-Tensiometer ist eine Sonderform der TDR-Sonde zur Bestimmung des Matrixpotentials. Dieses Meßsystem deckt einen Messbereich von 0 bis 10.000 hPa ab, ist wartungsfrei und von der Bodenstruktur unabhängig. Das EQUI-Tensiometer bestimmt zunächst den Wassergehalt eines im Boden befindlichen Gleichgewichtskörpers. Da dessen Materialkonstanten bekannt sind und sich dieser mit dem Bodenwasser im Gleichgewicht befindet kann daraus das Matrixpotential ermittelt werden (KELLER 1997).

3.2.5.2 LEITFÄHIGKEITSMESSUNG

Die Messung der Leitfähigkeit beruht darauf, dass im Bodenwasser gelöste Salze den Strom zwischen zwei im Boden befindlichen Elektroden leiten. Je nach dem Wassergehalt des Bodens wird dabei ein unterschiedlicher Widerstand gemessen. Zur Ermittlung des tatsächlichen Wassergehaltes bzw. des Matrixpotentials müssen für jede Bodenart entsprechend Eichkurven erstellt werden. Die Schaltpunkte für eine Bewässerungssteuerung sind je nach Boden bzw. Substrat und dem Salzgehalt individuell zu ermitteln.

Gipsblocksensoren

Bei dieser Methode wird das Gesamtwasserpotential, das dem Matrixpotential entspricht, gemessen (SCHACHTSCHABEL et al. 1989). Um den Salzgehalt, der bei der reinen Leitfähigkeitsmessung störend wirkt, auszuschalten werden die Elektroden in einem Gipsblock befestigt. Der elektrische Widerstand, den der Gipsblock dem Stromdurchgang bietet ist nur von der leitenden Eigenschaft der gesättigten Gipslösung in seinen Poren abhängig. Die Lösung steht hinsichtlich ihrer Wasserspannung im Gleichgewicht mit dem umgebenden Boden. Um das Matrixpotential erfassen zu können muss für jeden Sensor eine Eichkurve erstellt werden (HARTGE 1989). Gipsblockelektroden sind für einen Messbereich > 1000 hPa geeignet.

Watermarksensoren

Sonderformen der Gipsblock-Sensoren sind die sogenannten Watermark-Sensoren. Sie bestehen nicht aus massivem Gips sondern aus einem gipsgetränkten Gewebe. Ihr Messbereich wird von 30 bis 2000 hPa angegeben (KELLER 1997).

3.2.5.3 KAPAZITIVE METHODE

Das kapazitive Messprinzip ist eine weitere Methode zur Bestimmung des Wassergehaltes. Die Kapazität eines Kondensators ist von dem Medium zwischen 2 Platten, in diesem Fall vom Boden und dem Wassergehalt der Bodens, abhängig. Um bei diesem Messprinzip exakte Werte zu erhalten ist für jede Bodenart eine Eichkurve zu erstellen. Das ENVIROSCAN-System der Firma Sentek (SENTEK 1997) verwendet dieses Messprinzip um die Bodenfeuchte in verschiedenen Bodentiefen zu überwachen (Abb. 3.8).

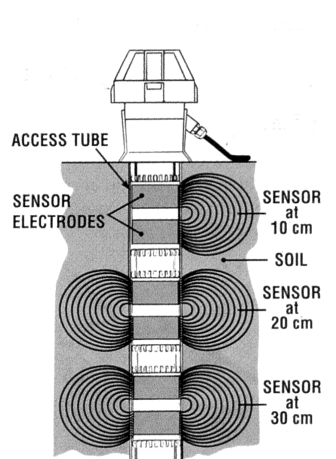


Abb. 3.8: ENVIROSCAN zur Überwachung der Bodenfeuchte in verschiedenen Bodentiefen (SENTEK 1997).

3.2.5.4 TENSIOMETRIE

Die Tensiometrie wird auch als Saugspannungsmessung bezeichnet. Tensiometer bestehen aus einem keramischen porösen Tonkörper der über ein Plexiglasrohr mit einem Manometer in Verbindung steht. Das Plexiglasrohr ist mit Wasser gefüllt und vakuumdicht verschlossen. Der Tonkörper hat direkten Kontakt mit dem Boden und ist für Wasser und Ionen durchlässig. Je nach Wassergehalt des Bodens entsteht im Inneren ein mehr oder weniger starker Unterdruck. Tensiometer sind für einen Messbereich < 800 hPa geeignet. Bei einem Unterdruck > 800 hPa dringt Luft über Poren der Tonzelle in das System, so dass es sich langsam entleert. Je nach Bauart der Tensiometer ist die Höhe der Wassersäule, die bereits von sich aus einen Unterdruck erzeugt, zu berücksichtigen. Die am Manometer angezeigten Messwerte sind dementsprechend zu korrigieren (Abb. 3.9).

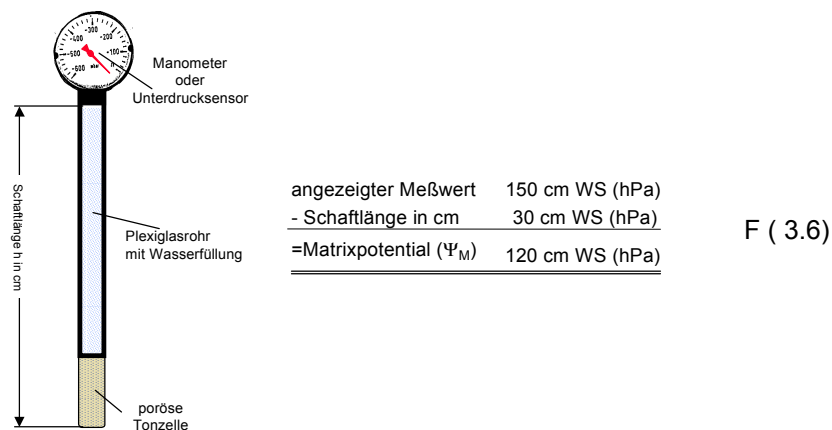


Abb. 3.9: Aufbau und Korrektur der Messwerte eines Tensiometers.

Zur Bewässerungssteuerung können auch Tensioschalter bzw. Tensiostate eingesetzt werden. Der Aufbau entspricht dem eines Tensiometers. Ein angeflanschter Unterdruckschalter mit Arbeits- und Ruhekontakt kann für eine entsprechende Regelung verwendet werden. Tensioschalter haben je nach Ausführungsform einen werkseitig, fest eingestellten, Schaltpunkt. Sollen unterschiedliche Feuchteverhältnisse realisiert werden sind entsprechende Schalter zu verwenden.

3.2.6 WASSERSPANNUNG UND WASSERGEHALT

Die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt wird in der für den entsprechenden Boden ermittelten pF-Kurve beschrieben (Abb. 3.10). Sie ist eine Summenkurve der Wasseranteile bei zunehmenden Potential.

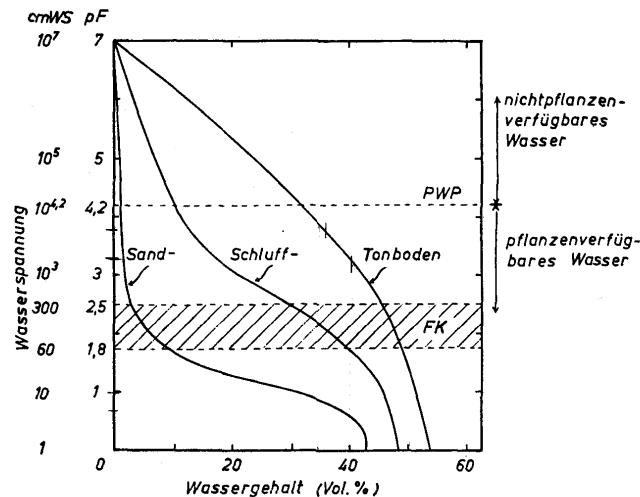


Abb. 3.10: Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung bei unterschiedlichen Bodenarten. FK=Feldkapazität, PWP=Permanenter Welkepunkt (SCHACHTSCHABEL et al. 1989).

Neben der Körnung (Sand, Schluff, Ton) hat das Gefüge einen Einfluss auf den Verlauf der pF-Kurve (SCHACHTSCHABEL et al. 1989).

Während einer Anbauperiode sind sowohl bei dem Anbau im gewachsenem Boden als auch in Substraten durch Bodenbearbeitung, Wurzelwachstum und dem Abbau von organischer Substanz Veränderungen im Porenvolumen und damit auch im Wasserhaushalt festzustellen (SCHACHTSCHABEL et al. 1989); (FISCHER und KALTHOFF).

3.2.7 WASSERSPANNUNG UND PFLANZENWACHSTUM

Aus Sicht der Pflanze ist das Matrixpotential (Wasserspannung) des Bodens der Widerstand, den sie bei der Wasseraufnahme überwinden muss. Nach BIERHUIZEN wirkt sich sowohl ein vermindertes als auch ein zu hohes Wasserangebot negativ auf das Pflanzenwachstum aus (Abb. 3.11) (BIERHUIZEN und VOS 1959).

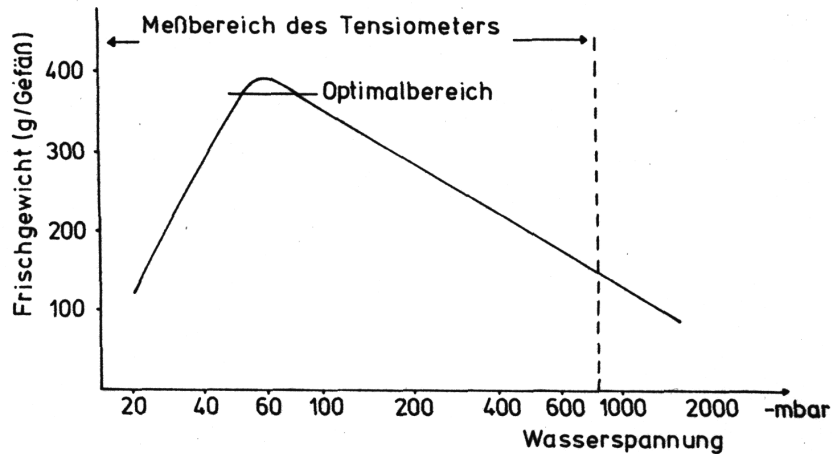


Abb. 3.11: Einfluss der Wasserspannung (Matrixpotential) auf das Wachstum (BIERHUIZEN und VOS 1959).

Die Ertragseinbußen bei der geringen Wasserspannung sind durch Sauerstoffmangel im Wurzelbereich zu erklären. Mindererträge bei hohen Wasserspannungen sind auf die starke Wasserbindung und damit für die Pflanzen geringere Verfügbarkeit zurückzuführen.

Bei vielen Bewässerungsverfahren ist in den befeuchteten Boden- bzw. Substratschichten aufgrund der Gießvorgänge ein stark schwankender Matrixpotentialverlauf festzustellen (Abb. 3.12).

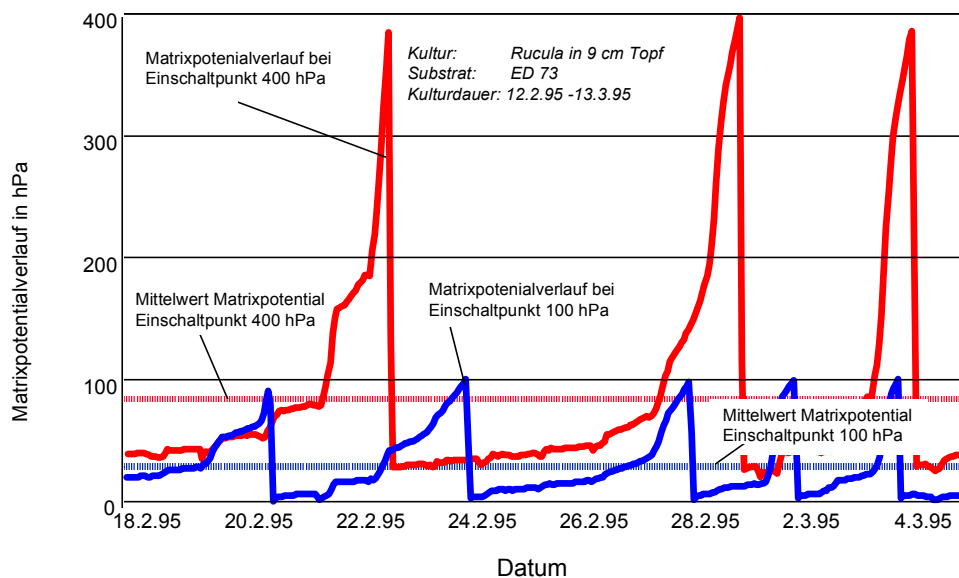


Abb. 3.12: Matrixpotentialverlauf und Mittelwert des Matrixpotentials bei Rucola im 9 cm Topf mit Ebbe-Flut-Bewässerung. Bewässerungssteuerung über Tensioschalter (100 und 400 hPa Einschaltpunkt) (KELL et al. 1997).

Nach einem Bewässerungsvorgang fällt das Matrixpotential in der Regel stark ab um sich dann allmählich wieder aufzubauen. Bei einem Einschaltpunkt von 100 hPa wurde über den untersuchten Zeitraum ein Mittelwert des Matrixpotentials von 30 hPa und bei einem Einschaltpunkt von 400 hPa war der Mittelwert 85 hPa (Abb. 3.12).

Für die Bewässerungssteuerung von Gewächshauskulturen werden bei einer direkten Messung im Substrat bzw. Boden von FRENZ Schaltpunkte von 60 bis 120 hPa empfohlen (FRENZ 1979), für den Freilandanbau von WILHELM und MAYER Schaltpunkte zwischen 120 bis 400 hPa (WILHELM und MEYER 1992).

3.3 DAS WASSER IN DER PFLANZE

Wasser ist ein wesentlicher Bestandteil (70-95%) von Pflanzen und wird für Photosynthese und Kohlenhydratbildung benötigt (Abb. 3.13).

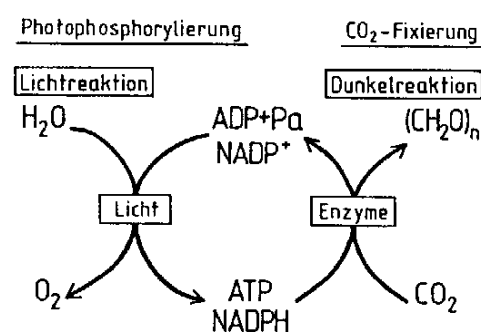


Abb. 3.13: Licht und Wasser als Voraussetzung für die Photosynthese (GARDNER et al.1985).

In der Pflanze dient das Wasser als Transportmittel. Einige Nährstoffe wie z.B. Calcium werden von der Pflanze passiv mit dem Transpirationsstrom aufgenommen und transportiert. Wasser hat eine hohe Wärmekapazität. Durch den Energieverbrauch bei dem Verdunstungsprozess werden die Blattflächen gekühlt und damit günstige Bedingungen für die Photosynthese geschaffen. Weiterhin vermittelt das Wasser über den Turgordruck der Pflanze ihre typische Form und Festigkeit. Durch das Öffnen und Schließen der Stomata wird nicht nur der Wasserhaushalt der Pflanze, sondern auch die Kohlendioxid- und Sauerstoffversorgung und damit die Photosynthese beeinflusst.

Der größte Teil des aufgenommenen Wassers wird von der Pflanze über die Stomata wieder ausgeschieden. Kulturpflanzen im gemäßigten Klima benötigen zur Bildung von einem kg Trockensubstanz ca. 300-800 kg Wasser (EHLERS 1996).

3.3.1 WIDERSTÄNDE FÜR DAS WASSER IN DER PFLANZE

Das Wasser wird von der Pflanze über die Wurzeln aufgenommen und im Xylem transportiert. Der radiale Widerstand im Rindenparenchym zwischen Wurzeloberfläche und Zentralzylinder wird höher als der axiale Widerstand im Rindenparenchym eingeschätzt (MOHR und SCHOPFER 1992). Der Widerstand im Xylem des Sprosses ist vergleichsweise gering. Ein erheblicher Widerstand besteht für die Dampfphase des Wassers in der Cutikula. Die cutikuläre Transpiration beträgt 10 % der Gesamttranspiration. 90 % der aufgenommenen Wassermenge werden über die Stomata (stomatäre Transpiration) ausgeschieden (MOHR und SCHOPFER 1992).

Im Pflanzeninneren verdunstet das Wasser von den an die Interzellularen grenzenden Zellen. Es wird angenommen, dass die Luft in den Hohlräumen des Blattes mit Wasserdampf gesättigt ist (THORNLEY und JOHNSON 1990). Aus dem Interzellularraum entweicht der Wasserdampf über die Stomata aus der Pflanze. Infolge eines Randeffektes werden die austretenden Wasserdampfmoleküle nach allen Seiten abgelenkt und bilden Wasserdampfkuppen um die Stomata (EHLERS 1996) (Abb. 3.14). Aufgrund der hohen Luftfeuchte hat die Luft unmittelbar am Blatt ein geringes Wasserdampf-sättigungsdefizit. Diese Schicht wird als Grenzschicht bezeichnet, stellt eine Diffusionsbarriere für den austretenden Wasserdampf dar und wird durch die Luftbewegung (Wind) beeinflusst (Kap. 3.4.4). Der Kehrwert des stomatären Widerstandes wird auch als stomatärer Leitwert bezeichnet und wurde von SCHMIDT modelliert (SCHMIDT 1989).

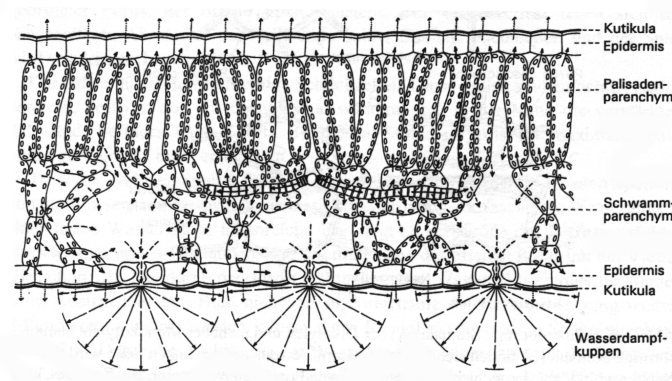


Abb. 3.14: Weg der Wassermoleküle vom Xylem bis in die äußere Atmosphäre (NULTSCH 1991).

Die Feinregulierung der Transpiration über die Stomata ist nicht bei allen Pflanzenarten gleich ausgeprägt (EHLERS 1996). Durch eine Anreicherung von osmotisch wirkenden Substanzen fließt Wasser in die Schließzellen. Mit der Erhöhung des Turgors werden die beiden Schließzellen zwangsweise auseinandergebogen, so dass ein offener Spalt entsteht.

Das Öffnungsverhalten wird durch eine Reihe von äußeren Faktoren beeinflusst (Abb. 3.15):

- Wasserversorgung der Pflanze. Verliert die Pflanze Wasser aus ihrem Gewebe, sinkt der Turgor und die Spaltöffnungen schließen sich.
- Sättigungsdefizit der Luft.
- Licht und Dunkelheit.
- CO₂-Konzentration. Sinkt in den Interzellularen die CO₂-Konzentration in den Morgenstunden aufgrund steigender Photosynthese so öffnen sich die Spaltöffnungen.
- Temperatur. Innerhalb des Temperaturbereichs zwischen 10 und 25°C sind die Einflüsse auf das Öffnungsverhalten der Stomata gering. Bei Temperaturen über 30 bis 35 °C können die Spaltöffnungen hingegen zum Schließen gebracht werden, was vermutlich auf eine verstärkte CO₂ Freisetzung infolge erhöhter Atmung zurückzuführen ist.

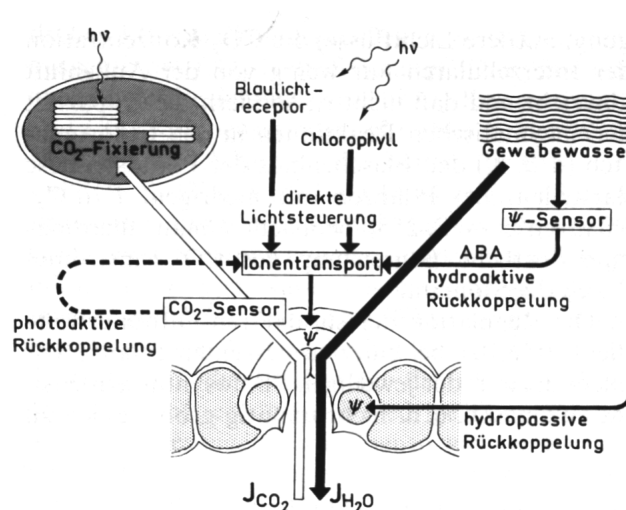


Abb. 3.15: Modell zur Regelung bzw. Steuerung des stomatären Gastransportes (MOHR und SCHOPFER 1992).

3.3.2 WASSERVERBRAUCH UND BLATTFLÄCHE

Der Wasserverbrauch eines Pflanzenbestandes wird maßgeblich durch dessen Blattfläche bestimmt. Zur Beschreibung eines Pflanzenbestandes wird häufig der sog. Blattflächenindex (Leaf Area Index, LAI), der als Blattoberfläche (A_{bl}) je Einheit Bodenoberfläche (A_G) definiert ist, angegeben.

$$LAI = \frac{A_{bl}}{A_G} \quad F (3.7)$$

Aufgrund veränderter Umgebungsbedingungen (Einstrahlung, Temperatur, Luftfeuchte) ist innerhalb eines Pflanzenbestandes bzw. mit zunehmendem LAI mit einem veränderten Transpirationsverhalten zu rechnen (EHLERS 1996). Aufgrund der gegenseitigen Beschattung der Blattflächen und der damit verbundenen Minderung der eingestrahlten Energie nimmt die Transpirationsrate mit steigendem Blattflächenindex nicht linear zu (Abb. 3.16).

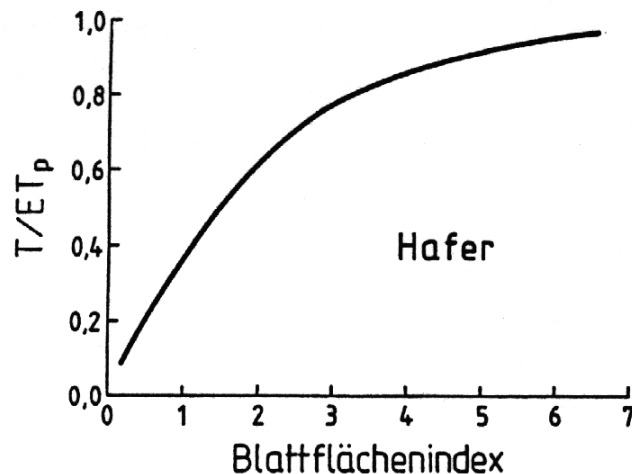


Abb. 3.16: Verhältnis der Raten von Transpiration (T) und Evapotranspiration (ET_p) in Abhängigkeit des Blattflächenindex bei Hafer (EHLERS 1991).

3.3.3 WASSERVERBRAUCH UND NÄHRSTOFFVERSORGUNG

Obwohl in dieser Arbeit auf die Nährstoffversorgung der Pflanzen nicht eingegangen wird, muss darauf hingewiesen werden, dass eine optimale Nährstoffversorgung ein gesteigertes Pflanzenwachstum und parallel dazu eine höhere Transpiration bedingt. Verschiedene Nährstoffe wie z.B. Kalium haben einen direkten Einfluss auf den Wasserhaushalt der Pflanzen. Kalimangel stört den Schließmechanismus der Stomatazellen. Die Schließbewegungen werden verlangsamt (BERGMANN, 1988).

Der Bodenwassergehalt und das Bewässerungssystem wirken sich auf Nährstoffverfügbarkeit und -transport aus. Da im Gewächshausanbau die Nährstoffe oftmals mit dem Gießwasser ausgebracht werden, sind je nach Düngekonzept bei unterschiedlichem Wasserverbrauch unterschiedliche Auswirkungen auf die Nährstoffversorgung des Pflanzenbestandes zu erwarten.

3.3.4 WASSERSTRESS DER PFLANZEN

Geraten Pflanzen in Wasserstress, so kann der Zustand nicht nur optisch (Pflanzen welken), sondern auch messtechnisch z.B. über eine direkte Transpirationmessung verfolgt werden. TANNER in EHLERS beschreibt eine Methode, in der die über eine Wärmebildkamera erfasste Blatttemperatur zur Berechnung eines Wasser-Stress Index CWSI (Crop-Water-Stress-Index (Abb. 3.17)) verwendet wird (EHLERS 1996). Transpirieren Pflanzen bei guter Wasserversorgung optimal, ist ihre Blatttemperatur gegenüber der Lufttemperatur aufgrund der Verdunstungskälte erniedrigt. Bei Wassermangel schließen die Stomata, die Transpiration ist vermindert und die Blätter kühlen weniger stark ab. Da die Temperaturdifferenz ($T_{bl}-T_L$) nicht nur von der Transpiration, sondern auch vom Sättigungsdefizit der Luft ($e_s(T)-e$) abhängt, wird diese in Abhängigkeit des Sättigungsdefizits angegeben.

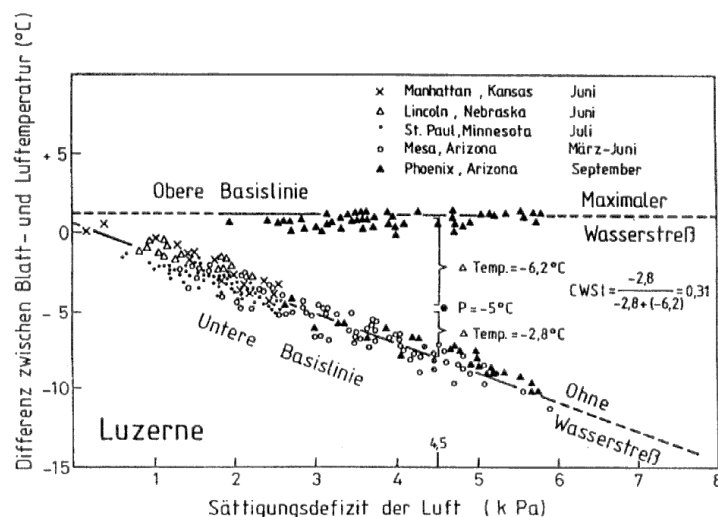


Abb. 3.17: Crop-Water-Stress-Index bei Luzerne nach IDSO 1982 in EHLERS (EHLERS 1996).

Bei ausreichender Bodenwasserversorgung und maximaler Blatttranspiration nimmt die Blatttemperatur mit zunehmendem Sättigungsdefizit ab (Abb. 3.17 Untere Basislinie). Die obere Basislinie ergibt sich bei maximalen Wasserstress bei vollständigem Stomataschluss. Sie liegt über der Lufttemperatur.

Das in Abb. 3.17 dargestellte Berechnungsbeispiel geht von einer gegenüber der Lufttemperatur um minus 5 °C niedrigeren Blatttemperatur (Punkt „P“) und einem Sättigungsdefizit von 4,5 kPa aus. Da die Temperaturerniedrigung ($\Delta Temp$) um 2,8°C geringer als die ohne Wasserstress zu erwartende Differenz war, liegt eine verminderte Transpiration vor. Der Stressindex beträgt 0,31.

3.4 ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN TRANSPIRATION UND KLIMA

3.4.1 TRANSPIRATION UND DAS WASSERPOTENTIAL DER LUFT

BIERHUIZEN und SLAYTER wiesen die Transpiration (T_r) in Abhängigkeit der Konzentrationsunterschiede des Wasserdampfes innerhalb (χ_{iB}) und außerhalb des Blattes (χ_{aB}) nach (BIERHUIZEN und SLAYTER 1965). Sie berücksichtigten die Diffusionswiderstände am Blatt (Grenzschichtwiderstand (r_{aB})) und den Diffusionswiderstand im Blatt (r_{iB}) (Kap 3.3.1).

$$T_r = \frac{\chi_{iB} - \chi_{aB}}{r_{iB} + r_{aB}} \quad F (3.8)$$

Die Pflanze hat keine internen Mechanismen zur Erhöhung des Wasserpotentials. Treibende Kraft für den Wassertransport sind abfallende Wasserpotentialgradienten (MOHR und SCHOPFER 1992). Das Wasserpotential der Luft (Ψ_L) ist für die Höhe des Transpirationsstromes die entscheidende Größe. Es kann aus der allgemeinen Gaskonstante ($R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), der Temperatur (T), dem normalen Molvolumen von Wasser ($V_{(H_2O)} = 18,015 \text{ ml mol}^{-1}$ bei 0°C) und der relativen Luftfeuchte (ϕ) berechnet werden (MOHR und SCHOPFER 1992):

$$\Psi_L = \frac{R \cdot T}{V_{H_2O}} \cdot \ln \frac{\phi}{100} \quad F (3.9)$$

Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge des Wasserpotentials der Luft mit der Temperatur und der Luftfeuchte wurde aus obiger Formel Abb. 3.18 aufgebaut. Hat die Luft ihre maximale Sättigung erreicht (100 % relative Luftfeuchte) ist ihr Wasserpotential per Definition gleich Null.

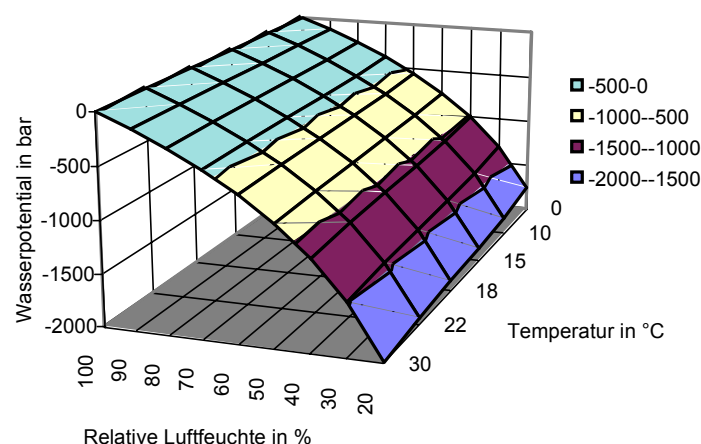


Abb. 3.18: Das Wasserpotential der Luft in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte.

Als Sättigungsdefizit wird die noch bestehende Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf ($e_s(T) - e = \Delta p_L$) bezeichnet. Für die Stärke der Verdunstung ist dies von großer Bedeutung (EIMERN 1984). Es wird aus dem Dampfdruck (e), dem Sättigungsdampfdruck ($e_s(T)$) bei der vorherrschenden Lufttemperatur (T) und der relativen Luftfeuchte (φ) berechnet (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK 1996)):

$$e_s(T) - e = \Delta p_L = e_s(T) \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{100}\right)$$

$$\Delta p_L = \left(6,11 \cdot \exp\left(\frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T}\right)\right) \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{100}\right) \quad F (3.10)$$

Ist wie bei der Transpiration eine Oberfläche (Blattfläche) beteiligt, deren Temperatur sich von der Lufttemperatur unterscheidet, so ist die Aussagekraft des Sättigungsdefizits und des Wasserpotentials nicht ausreichend. Um die an der Verdunstung beteiligten Oberflächen zu berücksichtigen wurde von SCHMIDT die Dampfdruckdifferenz (Δp_{BL}) eingeführt (SCHMIDT 1989). Bei der Ermittlung der Dampfdruckdifferenz geht man davon aus, dass bei einer Wasserdampfpartialdruckdifferenz zwischen dem Dampfdruck der Luft (e_L) und dem Dampfdruck der an der Verdunstung beteiligten Blattfläche, ein Ausgleich stattfindet. Da direkt an der Oberfläche bzw. in den Interzellularen 100 % Luftfeuchte herrschen (THORNLEY und JOHNSON 1990) wird für den Dampfdruck der beteiligten Oberfläche der Sättigungsdampfdruck ($e_{s(T_{bl})}$) bei der vorherrschenden Blatttemperatur (T_{bl}) verwendet. Der Dampfdruck der Luft wird aus der relativen Luftfeuchte (φ) und der Lufttemperatur (T_L) berechnet. Bei einer von der Lufttemperatur abweichenden Oberflächentemperatur sind zwischen dem Sättigungsdefizit und der Dampfdruckdifferenz Unterschiede vorhanden (Abb. 3.19).

$$\Delta p_{BL} = e_{s(T_{bl})} - e_L$$

$$\Delta p_{BL} = \left(6,11 \cdot \exp\left(\frac{17,62 \cdot T_{bl}}{243,12 + T_{bl}}\right)\right) - \left(6,11 \cdot \exp\left(\frac{17,62 \cdot T_L}{243,12 + T_L}\right) \cdot \frac{\varphi}{100}\right) \quad F (3.11)$$

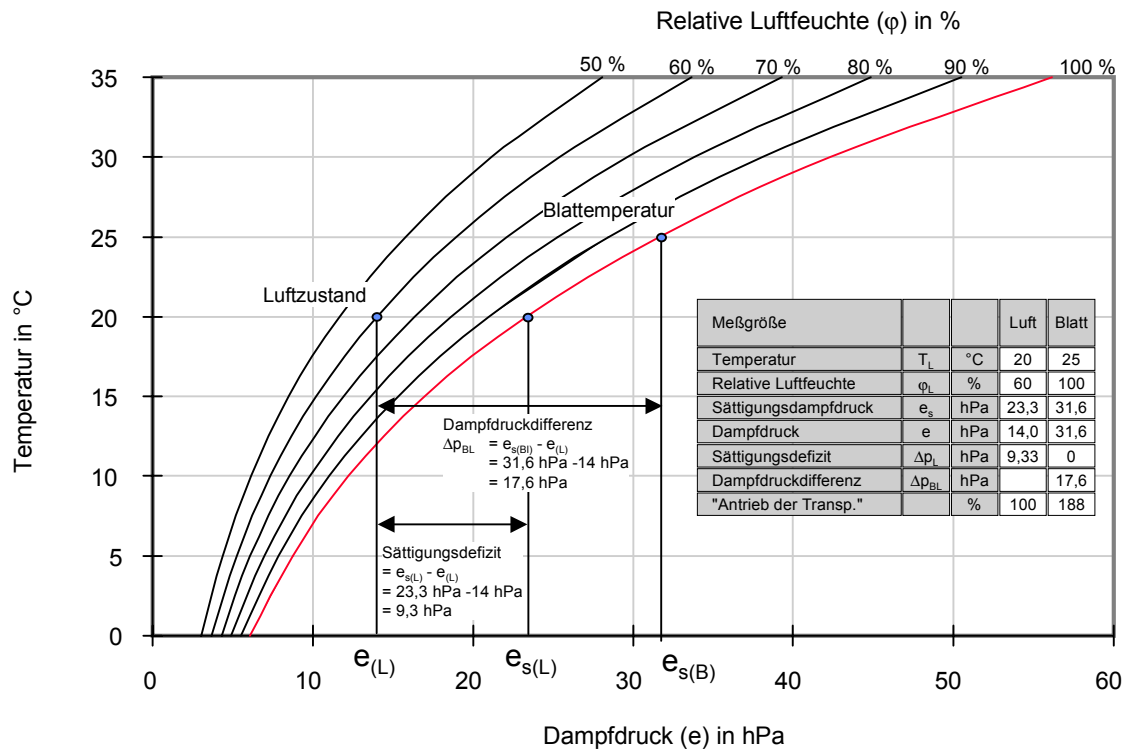


Abb. 3.19: Sättigungsdefizit und Dampfdruckdifferenz eines gegenüber der Lufttemperatur (20°C) um 5°C wärmeren Blattes.

Noch deutlicher wird die Bedeutung des Sättigungsdefizits und der Dampfdruckdifferenz wenn die relative Luftfeuchte 100 % beträgt. Das Sättigungsdefizit und das Wasserpotential ist in diesem Fall 0 und somit würde bei der Verwendung des Sättigungsdefizits als Triebkraft für die Transpiration kein Wassertransport stattfinden. Bei der energetischen Betrachtung im hx-Diagramm (Abb. 3.20) ist dies nur der Fall, wenn die Lufttemperatur gleich der Oberflächentemperatur, sprich der Blatttemperatur, ist. In dem dargestellten Beispiel wurde eine Lufttemperatur von 20 °C und eine relative Luftfeuchte von 100 % angenommen. Hat die Blatttemperatur ebenfalls 20°C (Punkt A) so ist die Dampfdruckdifferenz 0. Weicht die Blatttemperatur von der Lufttemperatur ab (Punkt B und C) so entsteht eine Dampfdruckdifferenz und es findet aufgrund einer möglichen Enthalpieverringering auch bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % ein Wassertransport statt.

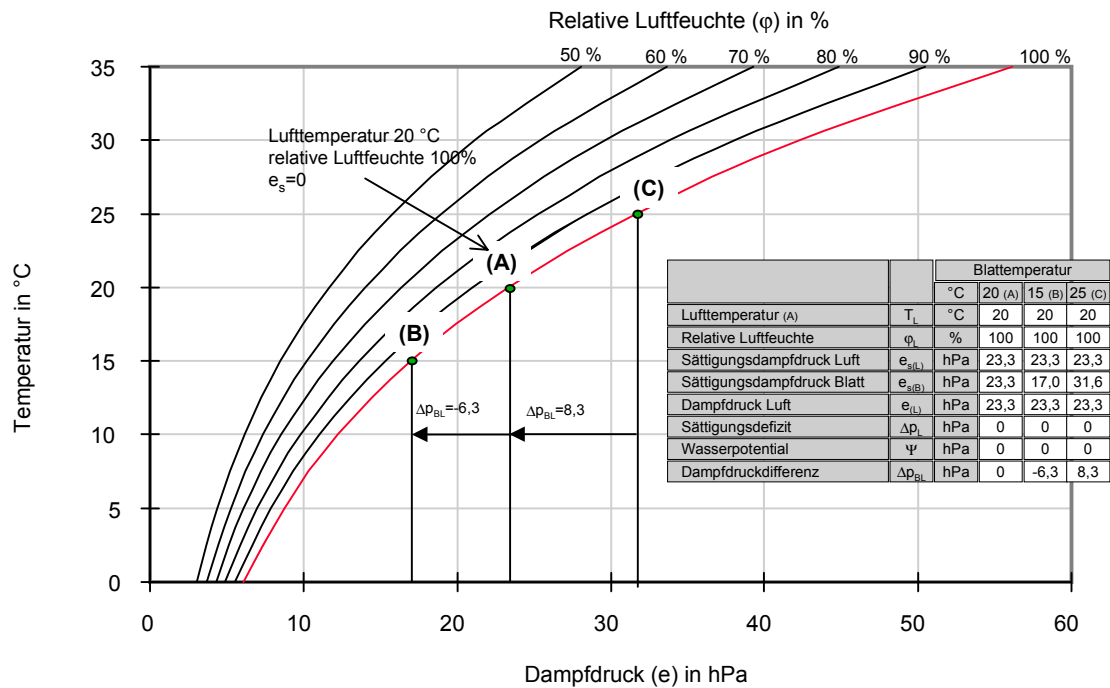


Abb. 3.20: Dampfdruckdefizit, Sättigungsdefizit und Wasserpotential der Luft bei 100% relativer Luftfeuchte, 20 °C Luft- und einer Blatttemperatur von 15°C (B), 20°C (A) und 25°C (C).

3.4.2 TRANSPIRATION UND TEMPERATUR

Die Lufttemperatur kann sich je nach Strahlung erheblich (-2°C bis +20°C) von der Blatttemperatur unterscheiden (MACKROTH 1972). Untersuchungen von HEIßNER an Paprika (Abb. 3.21) zeigen die Häufigkeitsverteilung der Differenz Blatt-Lufttemperatur (HEIßNER 1997).

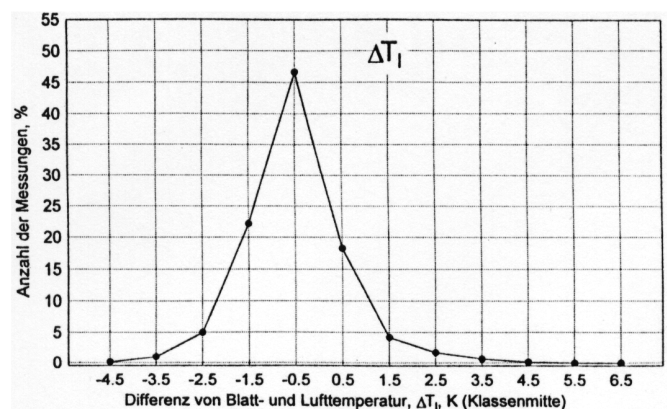


Abb. 3.21: Häufigkeitspolygon der Differenz Blatt- Lufttemperatur (HEIßNER 1997).

Für die Berechnung der Dampfdruckdifferenz zwischen der Luft und dem Pflanzenbestand muss die Blatttemperatur bestimmt werden. Neben der Modellierung der Blatttemperatur (SCHMIDT 1989) ist eine direkte Messung möglich. Dabei sind nach MACKROTH folgende Punkte zu berücksichtigen (MACKROTH 1972):

- Äußerst kleiner Sensor (Sensor darf keine Wärme an das Blatt abgeben).
- Keine Störung des Blattes und der Umgebungsluft durch den Sensor.
- Blatt darf nicht verletzt werden.
- Messort.

3.4.3 TRANSPIRATION UND STRAHLUNG

Die Strahlung ist Voraussetzung für die Photosynthese und damit für die Substanzbildung der Pflanzen. Wie das Sättigungsdefizit der Luft wird sie häufig als Motor der Evaporation und Transpiration beschrieben (EHLERS 1996). Sie liefert Energie für die Überleitung des flüssigen Wassers in die gasförmige Phase.

Die Strahlung kann nach verschiedenen Prinzipien gemessen werden. Zur Steuerung der Bewässerung und Schattierung wird häufig das sichtbare Licht über sog. Luxmeter außerhalb des Gewächshauses an einer zentralen Stelle erfasst. Die Messung der Globalstrahlung und photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) wird hauptsächlich in der Meteorologie eingesetzt. Eine Umrechnungstabelle der wichtigsten Strahlungsgrößen ist im Anhang (Tab-A 13) aufgeführt.

GRAFF und ENDE zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen der Einstrahlung und dem Wasserverbrauch der unterschiedlichen Wachstumsstadien auf (Abb. 3.22) (GRAFF und ENDE 1981).

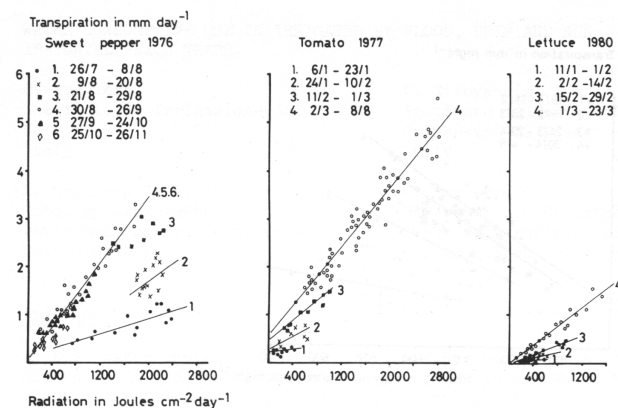


Abb. 3.22: Beziehung zwischen Globalstrahlung und Transpiration während verschiedener Wachstumsphasen bei Paprika, Tomate und Salat (GRAFF und ENDE 1981).

Neben einer direkten Wirkung auf die Öffnungsbewegungen (photoaktive Bewegung) der Stomata (RUGE 1966) wirkt die Strahlung durch die Umwandlung in Wärmestrahlung auf das Sättigungsdefizit und die thermischen Verhältnisse im Gewächshaus.

Bei der Betrachtung der Lichtverhältnisse innerhalb eines Pflanzenbestandes muss berücksichtigt werden, dass aufgrund gegenseitiger Beschattung der Strahlungseinsatz der einzelnen Pflanzenteile unterschiedlich ist (HEIßNER 1997).

3.4.4 TRANSPIRATION UND LUFTBEWEGUNG

Wird die Luftschicht in direkter Umgebung der Stomata (Grenzschicht) durch eine ständige Luftbewegung gestört und Luft mit einem niedrigeren Wasserpotential herbeigeführt, so steigt die Intensität der stomatären Transpiration (Abb. 3.23).

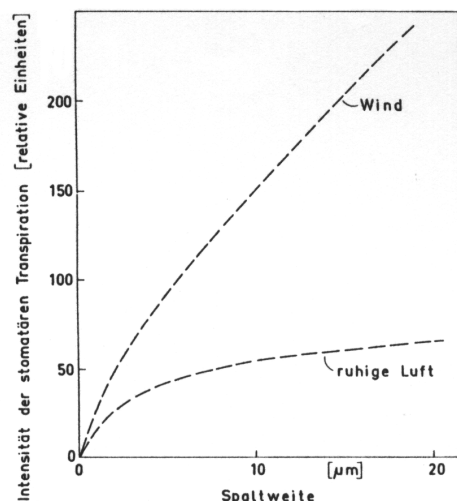


Abb. 3.23: Einfluss der Spaltenweite (Öffnung der Stomata) und der Luftbewegung auf die Transpiration (MOHR und SCHOPFER 1992).

Im Gewächshaus wird die Luftbewegung durch die Öffnung der Lüftung, das Heizungssystem, offene Türen, Konvektionsströme u.a. beeinflusst.

Die Luftwechselzahl, die ein Maß für den Austausch der Luftmasse pro Zeiteinheit darstellt, kann für geschlossene Gewächshäuser durch Messung der CO_2 -Konzentration zum Zeitpunkt t und $t+1\text{h}$ berechnet werden (LECKER 1985). Bei geöffneten Lüftungen ist dieses Verfahren allerdings mit Fehlern behaftet (LECKER 1997).

3.5 MODELLE ZUR WASSERBEDARFSBERECHNUNG

Der Wasserverbrauch (w_G) einer bepflanzten Fläche ist die Summe der durch die Pflanzen transpi-
rierten Wassermenge (w_{Tr}), der Wassermenge, die über den Boden verdunstet (Evaporation; w_E), der
Wassermenge, die im Boden gespeichert wird (Δw_{bo}) und der Wassermenge, die durch Versickerung
(m_v) verloren geht (DVWK 1996).

$$w_G = w_{Tr} + w_E + w_V + \Delta w_{bo} \quad F (3.12)$$

Bei der Evaporation tritt das Bodenwasser aus dem feuchten Boden an der Bodenoberfläche von der
flüssigen in die gasförmige Phase über. Für diesen endogenen Prozess ist Strahlungsenergie not-
wendig. Besteht ein Dampfdruckdefizit, diffundieren die Wassermoleküle von der Bodenoberfläche
weg. Der Abtransport wird durch die Luftbewegung, durch Konvektionsströme und durch den Wind
verstärkt. Die Wasserverluste sind von der aus dem Boden nachgelieferten Wassermenge abhängig.

Die Evaporation kann, was für die Modellierung der Evaporation von entscheidender Bedeutung ist, in
3 Phasen eingeteilt werden (Abb. 3.24). In der ersten Phase, wenn der Boden noch weitgehend was-
sergesättigt ist, entspricht sie annähernd der Verdunstung einer freien Wasseroberfläche. Mit fort-
schreitender Austrocknung sinkt die Evaporationsrate bis sie in der 3. Phase einen gleichbleibend
niedrigen Wert erreicht.

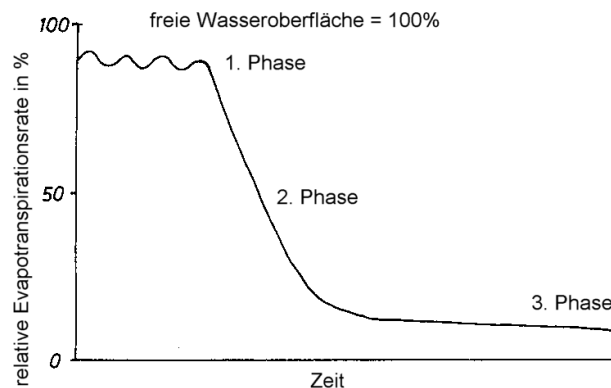


Abb. 3.24: Zeitlicher Verlauf der Evaporation aus einem Boden in dem das Wasser nicht ersetzt wird (HARTGE 1978).

Die Evaporation ist vor allem im Freiland ein wesentliches Glied des hydrologischen Kreislaufs. Im
Gewächshausanbau wird sie durch den Einsatz geeigneter Maßnahmen, wie z.B. dem Einsatz von
Tropfbewässerungen oder das Bedecken des Bodens mit einer Mulchfolie, reduziert.

3.5.1 VERDUNSTUNG AN WASSEROBERFLÄCHEN

DALTON verwendete im 18. Jahrhundert eine Funktion der Windgeschwindigkeit ($f(v)$), den Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur der Wasseroberfläche ($e_s(T_{wa})$) und den Dampfdruck der Luft (e), um die Verdunstung von einer freien Wasseroberfläche (E_{wa}) zu berechnen (DVWK 1996).

$$E_{wa} = f(v) \cdot (e_s(T_{wa}) - e) \quad F (3.13)$$

PENMAN entwickelte 1948 eine Gleichung, in der die Energiehaushaltsgleichung mit der DALTON-Gleichung kombiniert wurde (DVWK 1996). Neben der Windgeschwindigkeit wird das Sättigungsdefizit, die Nettostrahlung (R_n), die Verdunstungswärme des Wassers (L) und die Psychrometerkonstante ($\gamma = 0,65 \text{ hPa/K}$) berücksichtigt:

$$E_w = \frac{s \cdot R_n / L + \gamma \cdot f(v) \cdot (e_{s(T)} - e)}{s + \gamma} \quad F (3.14)$$

$$s = e_s(T) \cdot \frac{4284}{(243,12 + T)^2} \quad F (3.15)$$

(über Wasser)

3.5.2 EVAPOTRANSPIRATION

Zur Berechnung der Evapotranspiration werden sowohl empirisch gewonnene, als auch komplexe, physikalisch abgeleitete Funktionen verwendet. Aus methodischen Gründen wird zwischen der maximal möglichen Verdunstung (potentielle Evapotranspiration) und der tatsächlichen (aktuellen Evapotranspiration) unterschieden.

Die potentielle Evapotranspiration (ET_p) ist eine Näherung für die Verdunstung bewachsener Landflächen. In Zeitabschnitten mit hohen Bodenfeuchten bzw. häufigen Regenfällen ist die reale Evapotranspiration mit der potentiellen Evapotranspiration identisch. Bei austrocknendem Boden (Abb. 3.24) muss die potentielle Evapotranspiration über eine Reduktionsfunktion an die steigenden Verdunstungswiderstände im Boden angepasst werden.

Die potentielle Evapotranspiration wird u.a. für wasserwirtschaftliche Zwecke, Planung von Bewässerungsanlagen, Berechnungsberatung sowie zur Erstellung von Wasserhaushaltsmodellen eingesetzt (DVWK 1996).

Ein einfaches Berechnungsverfahren wurde von HAUDE (EIMERN 1984), der einen für die verschiedenen Monate feststehenden „HAUDE-Faktor“ (f) und das Sättigungsdefizit der Luft ($e_{s(T)} - e$) um 14.30 MEZ berücksichtigt, entwickelt.

$$ET_{p_{HAUDE}} = f \cdot (e_{s(T)} - e)_{14} \leq 7 \text{ mm/d} \quad F (3.16)$$

PENMAN kombinierte die Energiebilanzgleichung und die aerodynamischen Verhältnisse. Zur Berechnung der Evapotranspiration einer stets feuchten Bodenoberfläche lautet die Gleichung (EIMERN 1984):

$$E_{PENM} = \frac{s}{s + \gamma} \cdot \frac{R_n - G}{L} + \frac{\gamma}{s + \gamma} \cdot f(v) \cdot (e_{s(T)} - e) \quad F (3.17)$$

3.5.3 WASSERVERBRAUCH VON GEWÄCHSHAUSKULTUREN

STANGHELLINI in BAKKER leitet den Transpirationsflux von Pflanzen im Gewächshaus (E) von der Nettostrahlung (R_n), der Evaporationswärme (L), der Steigung der gesättigten Dampfdruckkurve (s), der psychrometrischen Konstante (γ), den Widerständen des Blattes (r_{bl}) und der Grenzschicht (r_{Gr}), der Wasserdampfkonzentration der Umgebung (χ_{ai} ; χ_a^*) und dem Blattflächenindex (LAI) ab (BAKKER et al. 1995):

$$E = \frac{\frac{s}{\gamma} \cdot \frac{R_n}{L}}{1 + \frac{s}{\gamma} + \frac{r_{bl}}{r_{Gs}}} + \frac{2 \cdot LAI (\chi_{ai}^* - \chi_{ai})}{\left(1 + \frac{s}{\gamma}\right) \cdot r_{Gs} + r_{bl}} \quad F (3.18)$$

HEIßNER bezieht die Transpiration von *Capsicum annuum* in einem empirischen Modell auf die Dampfdichtedifferenz zwischen Blatt und Umgebungsluft, die Blattfläche und die Strahlung ab (HEIßNER 1997). Er beschreibt die Transpiration verschiedener Bestandsschichten (i) als Funktion der Leitfähigkeit ($g(i)$) und der Dampfdruckdifferenz ($\Delta p_1(i)$). Die Leitfähigkeit ist wiederum eine Funktion in Abhängigkeit der Einstrahlung und der Feuchte ($f_1(Q)$; $f_2(\Phi)$). Als Messgröße geht die Bestrahlungsstärke (Q_0), die Lufttemperatur (T), die Luftfeuchte (Φ) sowie die Blattfläche (A_0) ein:

$$E(i) = g(i) \cdot \Delta p_1(i) \quad F (3.19)$$

$$g(i) = g \cdot f_1(Q(i)) \cdot f_2(\Phi) \quad F (3.20)$$

$$f_1(Q(i)) = 1 - \exp[-a_0 \cdot (Q(i) - a_1)] \quad F (3.21)$$

$$Q(i) = Q \cdot \exp(-k \cdot A(i)) \quad F (3.22)$$

$$A(i) = \frac{1}{6} \cdot (2 \cdot i - 1) \cdot A \quad F (3.23)$$

$$f_2(\Phi) = 1 + b_0 \cdot (\Phi - \Phi_0) \quad F (3.24)$$

SCHMIDT beschreibt in einer Modellgleichung den Transpirationsmassenstrom (Tr_{Pf}) eines Pflanzenbestandes in Abhängigkeit einer Transpirationskonstanten (σ), die im wesentlichen die stomatären und den Grenzschichtwiderstand beinhaltet, der Dampfdichtedifferenz ($[\chi^*(t_{bl}) - \chi(t_L)]$) sowie dem Blattflächenindex (LAI) (SCHMIDT 1999).

$$Tr_{Pf} = \sigma \cdot [\chi^*(t_{bl}) - \chi(t_L)] \cdot LAI \quad F (3.25)$$

Zur Berechnung der tatsächlich in einem bestimmten Zeitraum ($t-1$ bis t) verbrauchten Wassermenge (diese wird vw bezeichnet) eines Pflanzenbestandes muss der Transpirationsstrom über die Zeit integriert sowie die Dichte des Wassers berücksichtigt werden.

$$vw = \int_{t-1}^t (\sigma \cdot [\chi^*(t_{bl}) - \chi(t_L)] \cdot LAI) \cdot dt \cdot \delta_{H_2O} \quad F (3.26)$$

4 VERSUCHE ZUR ERMITTLUNG GEEIGNETER PARAMETER FÜR DIE BEWÄSSERUNGSSTEUERUNG VON GEWÄCHSHAUSKULTUREN

Wie aus den Untersuchungen zum Verhalten des Wassers im Boden, in der Pflanze und der Atmosphäre hervorgeht, ergeben sich verschiedene Parameter für eine mögliche Steuerung der Bewässerung von Pflanzen. Eine Zusammenfassung ergibt folgende Einflüsse:

- physikalisch begründeter Einfluss in Form der Dampfdruckdifferenz
- Widerstände durch die Stomataöffnung der Pflanze und den Grenzschichtwiderstand
- Pflanzengröße (Blattfläche).

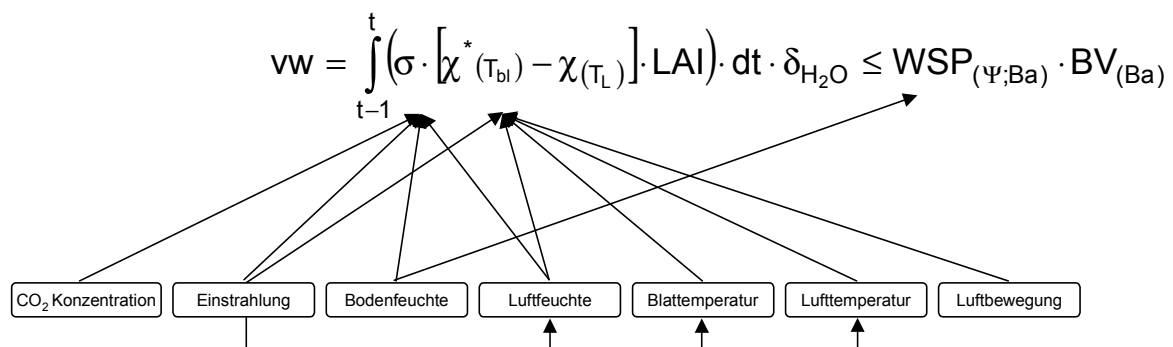


Abb. 4.1: Transpirationsmodell und Einflussfaktoren auf die Transpiration von Pflanzen.

Die Dampfdruckdifferenz sowie die Transpirationskonstante (σ), die im wesentlichen die stomatären und Grenzschichtwiderstände berücksichtigt, wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst (Abb. 4.1 und Kap. 3). Inwieweit die einfach zu messenden Parameter Einstrahlung, Luftfeuchte, Blattemperatur und Lufttemperatur und die daraus errechnete Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme bzw. Dampfdruckdifferenzsumme zur Steuerung der Bewässerung ausreichend sind, ist die zentrale Frage in den durchgeführten Untersuchungen.

Damit eine Wasserversickerung ausgeschlossen werden kann, muss die Wassermenge pro Gießvorgang dem durch die Tropfstellen befeuchtetem Bodenvolumen (BV_{Ba}), das von der Bodenart abhängig ist (Abb. 3.7) und der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens ($WSP_{(\Psi, Ba)}$), die vom Matrixpotential und der Bodenart abhängt, angepasst werden.

$$vw \leq WSP_{(\Psi;Ba)} \cdot BV_{(Ba)} \quad F (4.1)$$

4.1 VERSUCHSZIEL

In den experimentellen Untersuchungen sollen Kontrollstrategien zur Steuerung der Bewässerung aufgezeigt werden. Neben dem Zusammenhang des Wasserumsatzes mit der Bodenfeuchte werden die klimatischen Größen (Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme, Dampfdruckdifferenzsumme) und die Blattflächenentwicklung untersucht. Im einzelnen soll auf folgende Fragen eingegangen werden:

1. Welcher, für eine Bewässerungssteuerung geeigneter Parameter spiegelt den Wasserverbrauch der einzelnen Gießakte exakt wieder?
2. Sind durch die Pflanze definierte Parameter (z.B. Blattfläche bzw. LAI) in die Bewässerungssteuerung zu integrieren?
3. Können im Labor ermittelte, bodenphysikalische Parameter zur Verhinderung einer Wasserversickerung herangezogen werden?
4. Wie sind die in Frage kommenden Parameter in einer Bewässerungssteuerung zu kombinieren?

4.2 MATERIAL UND METHODEN

4.2.1 VERSUCHSORT

Die Versuche wurden in den Gewächshäusern (Venlobauweise) mit Einfachverglasung am Institut für Gemüsebau der FH Weihenstephan durchgeführt. Um Störgrößen wie z.B. die natürliche Sonneneinstrahlung auszuschalten wurden einige Untersuchungen in einem abgeschlossenen Raum ohne Sonneneinstrahlung unter Kunstlicht (Philips SON-T Lampen) vorgenommen.

4.2.2 VERSUCHSZEITRAUM

Die Versuche wurden von 1995-1998 durchgeführt. Da die, in den Versuchen verwendeten Gemüsearten nur zur Ermittlung der verschiedenen Parameter dienen werden in der weiteren Versuchsbeschreibung nur die Namen mit der entsprechenden Satznummer aufgeführt (Tab. 4.1). Details und Kulturdaten sind im Anhang beigelegt.

Tab. 4.1: Versuchszeitraum der durchgeführten Versuche

| Botanischer Name und Satz | Zeitraum | Versuchsfrage | Weitere Kulturdaten |
|--|-------------------|--|---------------------|
| <i>Apium graveolens I</i> | 16.05.95-18.08.95 | Ermittlung der maximal möglichen Gießwassermenge | Tab-A. 1 |
| <i>Brassica oleracea var. gongylodes I</i> | 26.01.95-30.03.95 | Wasserumsatz in Abhängigkeit verschiedener Parameter | Tab-A. 2 |
| <i>Capsicum annuum I</i> | 21.03.96-22.10.96 | Matrixpotentialerhöhung und Ertrag | Tab-A. 3 |
| <i>Cucumis sativus I</i> | 06.05.96-15.08.96 | Wasserumsatz in Abhängigkeit verschiedener Parameter | Tab-A. 4 |
| <i>Cucumis sativus II</i> | 04.04.97-15.08.97 | Matrixpotentialerhöhung und Ertrag | Tab-A. 5 |
| <i>Lactuca sativa I</i> | 09.02.95-30.03.95 | Wasserumsatz in Abhängigkeit verschiedener Parameter | Tab-A. 6 |
| <i>Lactuca sativa II</i> | 11.12.95-15.03.96 | Wasserumsatz in Abhängigkeit verschiedener Parameter | Tab-A. 7 |
| <i>Lactuca sativa III</i> | 08.01.98-6.03.98 | Blattflächenentwicklung | Tab-A. 8 |
| <i>Lycopersicon esculentum I</i> | 17.04.97-10.09.97 | Blattflächenentwicklung und Wasserverbrauch | Tab-A. 9 |
| <i>Lycopersicon esculentum II</i> | 12.04.95-21.09.95 | Matrixpotentialerhöhung und Ertrag | Tab-A. 10 |
| <i>Ocimum basilicum I</i> | 27.07.98-02.09.98 | Bodenfeuchte und Einstrahlungssumme | Tab-A. 11 |
| <i>Ocimum basilicum II</i> | 01.09.98-01.10.98 | Bodenfeuchte und Einstrahlungssumme | Tab-A. 11 |
| <i>Ocimum basilicum III</i> | 14.10.98-15.12.98 | Bodenfeuchte und Einstrahlungssumme | Tab-A. 11 |
| <i>Zantedeschia aethiopica I</i> | 01.02.95-30.02.95 | Matrixpotentialanstieg und Transpiration | Tab-A. 12 |

4.2.3 TECHNISCHER AUFBAU DER VERSUCHE

Der Aufbau, die verschiedenen Versuchsanordnungen sowie die eingesetzten Messgeräte und Sensoren werden nachfolgend beschrieben.

4.2.3.1 ERMITTLUNG VON GIEß- UND SICKERWASSERMENGE

Zur Ermittlung der Gieß- und Sickerwassermenge bei verschiedenen Wassergaben wurden 10 l Container mit sandigem Lehm befüllt. Die Bewässerung der Container wurde mit dem KLIWADU-System (FRENZ et al. 1988) tensiometergesteuert (Messtiefe 15 cm) bei 90 hPa und den je nach Variante vorgegebenen Wassermenge automatisiert. In jedem Container befand sich eine Tropfstelle. Sickerwasser wurde in den Sickerwassersammlern aufgefangen und täglich registriert (Abb. 4.2; Abb-A. 1).

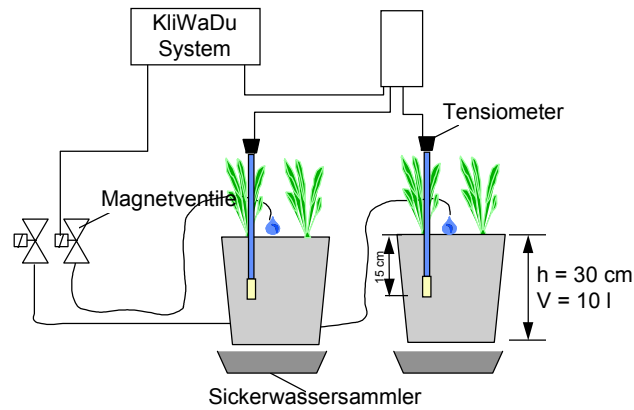


Abb. 4.2: Versuchsaufbau zur Ermittlung der maximal möglichen Wassermenge pro Gießvorgang.

4.2.3.2 BESTIMMUNG VON PF-KURVEN

Zur Bestimmung von pF-Kurven wurden aus einem Gewächshaus (Standort Weihenstephan; sandiger Lehmboden) mit Stechzylindern (\varnothing innen 8,8 cm Höhe 6,0 cm) aus unterschiedlichen Tiefen Bodenproben entnommen. Die anschließend mit Wasser gesättigten Proben wurden nacheinander auf eine elektronische Waage gestellt, mit elektronischen Tensiometern versehen, mit einer Nadelstichfolie (Verdunstungsschutz) abgedeckt und langsam bei Zimmertemperatur getrocknet. Die Masse sowie das Matrixpotential wurden kontinuierlich aufgezeichnet (Abb. 4.3).

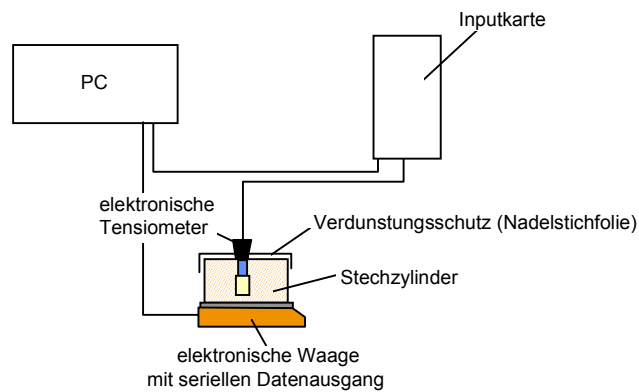


Abb. 4.3: Versuchsaufbau zur Bestimmung von pF-Kurven.

4.2.3.3 WASSERVERTEILUNG IN UND UM TROPFSTELLEN

Zur Ermittlung des Bodenwassergehaltes im Tropfstellenbereich wurden nach einem dreidimensionalen Raster (Abb. 4.4) Bodenproben entnommen und der gravimetrische Wassergehalt durch eine Trocknung bei 105°C bis zur Gesichtskonstanz bestimmt. Die X-Achse verläuft parallel zum Tropfschlauch. Die Y-Achse in die Tiefe („Messtiefe“) und die Z-Achse im 90° Winkel von der Tropfstelle weg („Senkrecht zum Tropfschlauch“). Die Probenahme erfolgte mit Stechzylindern (\varnothing innen 8,8 cm, Höhe 6,0 cm) in Abständen von 10 cm.

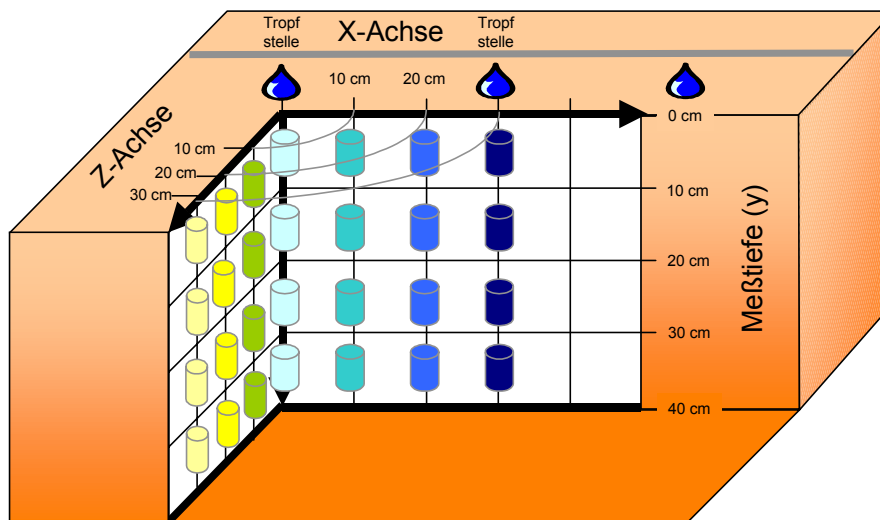


Abb. 4.4: Messorte zur Ermittlung des Bodenwassergehaltes in und um Tropfstellen.

4.2.3.4 WASSERUMSATZ IN ABHÄNGIGKEIT VERSCHIEDENER PARAMETER

Um den Wasserumsatz von Pflanzen in Abhängigkeit des Matrixpotentials und verschiedener klimatischer Größen zu ermitteln wurde eine Holzwanne (1m²) an einer elektronischen Waage aufgehängt (Abb. 4.5, Abb. 4.6, Abb-A. 2). Die Wanne wurde mit schwarzer PE-Folie ausgeschlagen, so dass ein geschlossenes System entstand in das ein Ton-Torf-Gemisch (ED 73, Firma Patzer) in einer Schichtstärke von 5 cm (50 l/m²) eingefüllt wurde. Um Evaporation zu verhindern wurde das Substrat mit weißer Mulchfolie bedeckt (Abb-A. 3). Die Wasserversorgung erfolgte über Einzeltropfer (System Volmatic, 9 Tropfstellen pro m²). Die Bewässerung wurde über das KLIWADU-System gesteuert, als Führungsgröße wurde die Bodenfeuchte, erfasst über elektronische Tensiometer, verwendet.

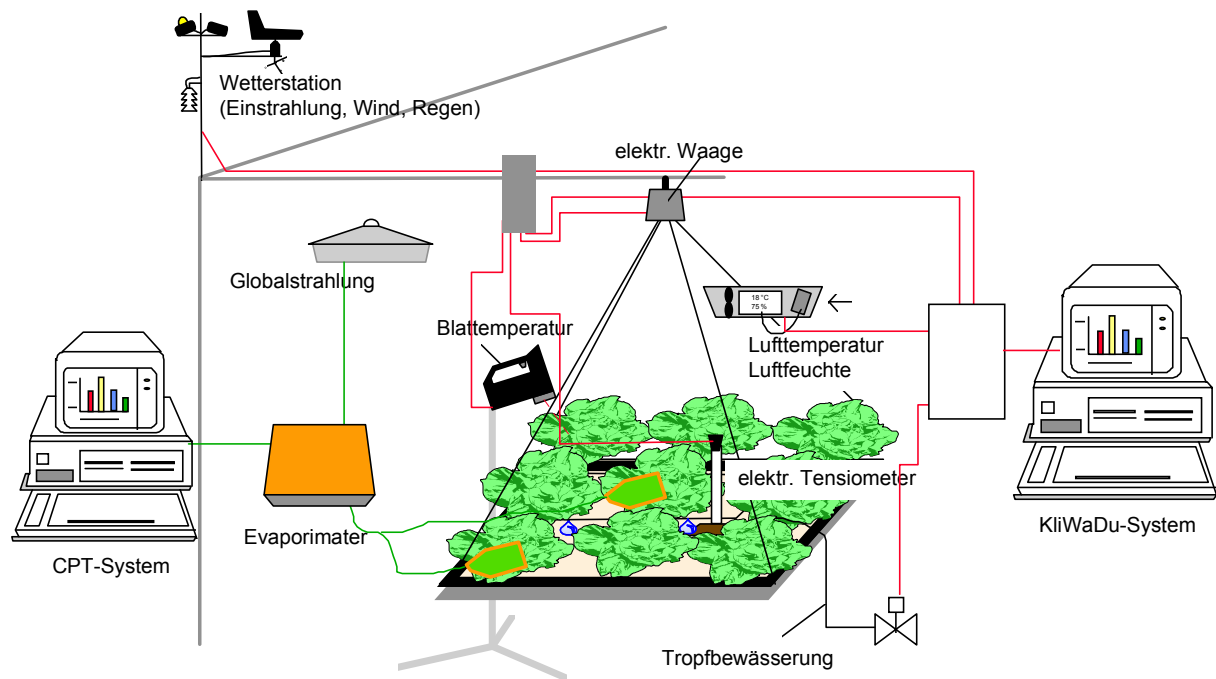


Abb. 4.5: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Wasserverbrauchs verschiedener Gemüsearten in Abhängigkeit der Bodenfeuchte und verschiedenen klimatischen Größen.

Bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I und *Lactuca sativa* I und II wurde über die elektronische Waage die Masse der Holzplatte einschließlich Aufhängekonstruktion und Substrat, das verabreichte bzw. verbrauchte Wasser sowie die Pflanzenmasse kontinuierlich erfasst. *Cucumis sativus* I wurden in 10 l Containern kultiviert (Abb.-A. 4). Durch eine getrennte Aufhängung von Töpfen und Pflanzen konnte bei *Cucumis sativus* I eine Erfassung der Pflanzenmasse ausgeschaltet werden. Der abgesenkte Pflanzenstiel wirkte als Gelenk, so dass keine Übertragung der Pflanzenmasse auf die Gefäße möglich war (Abb. 4.6).

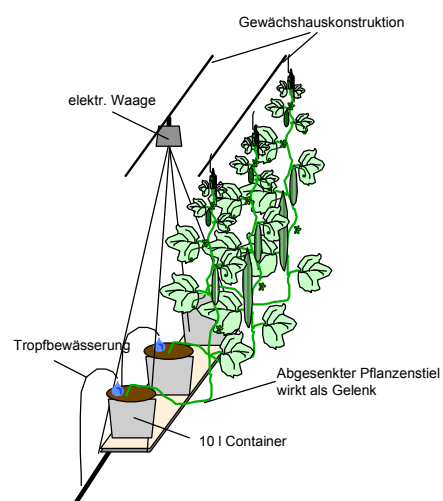


Abb. 4.6: Aufleitmethode zur Bestimmung des Wasserverbrauchs bei *Cucumis sativus* I.

Über das KLIWADU-System wurde die Lufttemperatur und die Luftfeuchte (ca. 20-30 cm über dem Pflanzenbestand), das Matrixpotential des Substrates, die Einstrahlung (sichtbares Licht), die Blatttemperatur sowie die Messwerte der elektronischen Waage erfasst und in 5-minütigen Abstand in ASCII-Dateien auf der Festplatte abgespeichert. Die Blattemperaturmessung erfolgte zunächst über Kontaktthermometer und später berührungslos mit einem nach dem Infrarot-Prinzip messendem Handmessgerät (Abb-A. 5). Dieses wurde ca. 30-40 cm über dem Pflanzenbestand an einem Stativ befestigt. Das Messgerät verfügte über einen analogen Ausgang, so dass eine kontinuierliche Messung möglich war. In einigen Versuchen wurde zusätzlich die Transpiration über ein Evaporimeter (CPT-System der Firma IBS Quedlinburg) ermittelt. Die technischen Daten aller verwendeten Sensoren sind im Anhang (Tab-A 14) aufgeführt.

4.2.4 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN UND STATISTISCHE METHODEN

Die in den Darstellungen der Versuchsergebnisse verwendeten Begriffe sind wie folgt definiert:

Gießzeitpunkt (t)

Der Zeitpunkt eines Gießvorganges wird als t und der des vorhergehenden als t-1 bezeichnet.

Gießtakt

Der Zeitraum zwischen zwei Bewässerungsvorgängen wird als Gießtakt bezeichnet (Abb. 4.7).

Wasserumsatz (mw, vw)

Als Wasserumsatz wird die verbrauchte Wassermenge pro Flächeneinheit bzw. pro Pflanze eines Gießtaktes definiert. Dieser wird als Summenkurve über den Zeitraum t-1 bis t dargestellt. Die einzelnen Bewässerungsvorgänge sind jeweils an dem steilen Anstieg des Masseverlaufs zu erkennen (Abb. 4.7). Der Wasserumsatz der Gießtakte wurde aus der Masse (m) und der zwischen 2 Bewässerungsvorgängen maximalen Masse (m_{Max}) berechnet (Abb. 4.7, Abb. 4.8, Abb. 4.9). Zur besseren Veranschaulichung und Möglichkeit des Vergleiches wurde statt der Masse (mw) das Volumen (vw) angegeben.

$$mw = (m_{\text{max}} - m) \cdot 1000 \frac{\text{ml}}{\text{l}} \quad \text{F (4.2)}$$

$$vw = mw \cdot \delta_{\text{H}_2\text{O}} = mw \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \quad \text{F (4.3)}$$

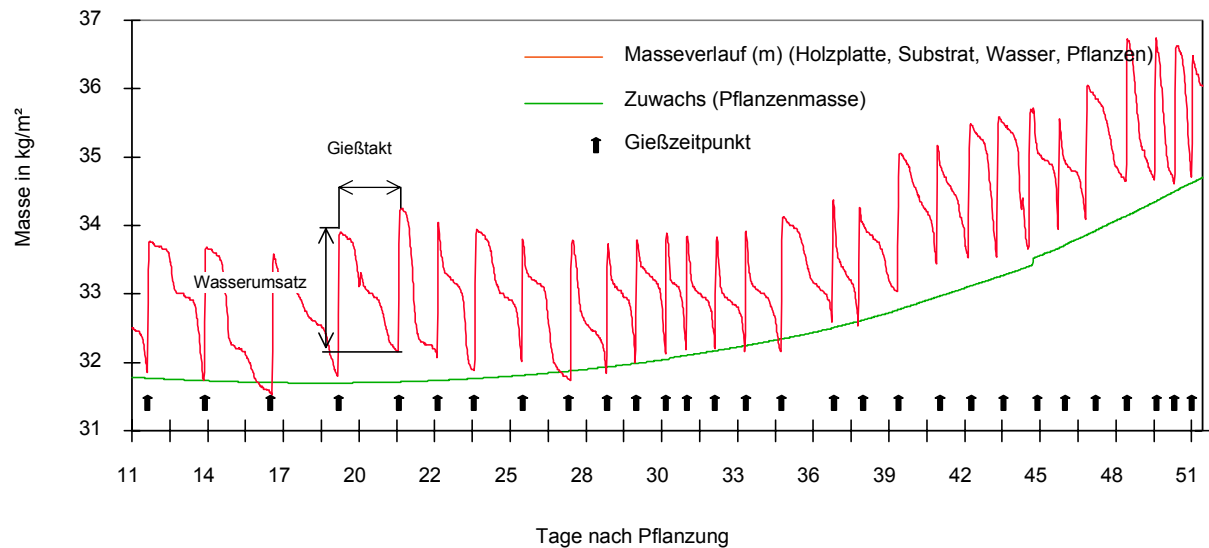


Abb. 4.7: Aufgezeichnete Masse und geschätzter Zuwachs bei *Brassica o. var. gongylodes* I.

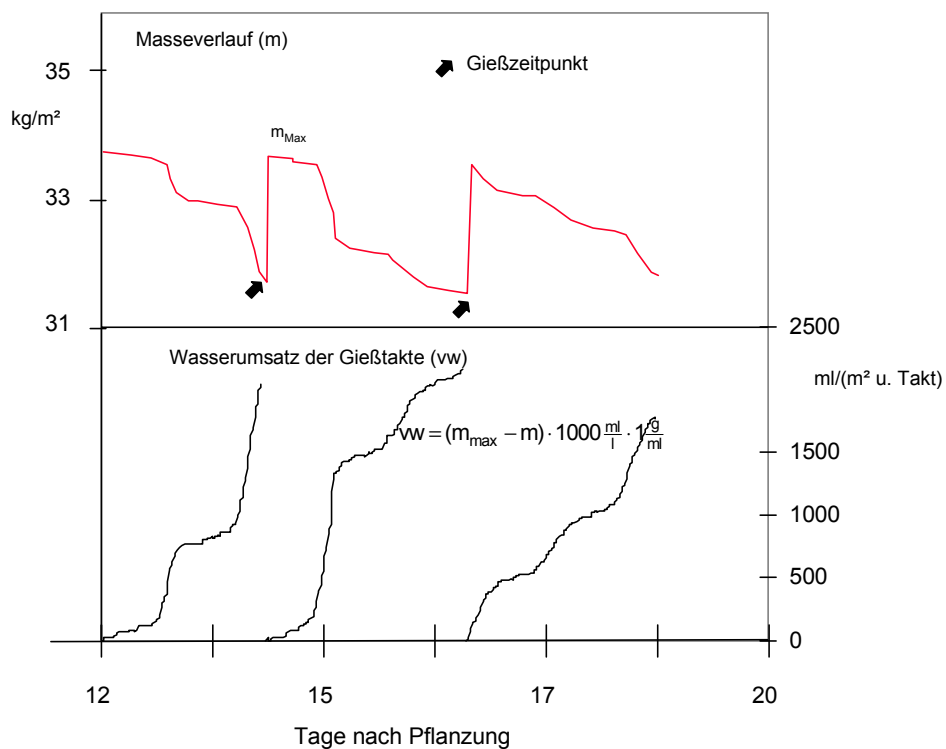


Abb. 4.8: Beispiel zur Berechnung des Wasserumsatzes (vw) eines Gießtaktes.

Fehlerhafte Messreihen sowie die während der Wasserausbringung von ca. 30 min erfassten Messdaten wurden nicht in die statistische Verrechnung einbezogen (Abb. 4.9) und aus den ursprünglichen Messdaten gelöscht. Durch das Löschen der Messreihen sind die teilweise unterschiedlichen Wassermengen pro Gießtakt zu erklären (Abb. 4.9).

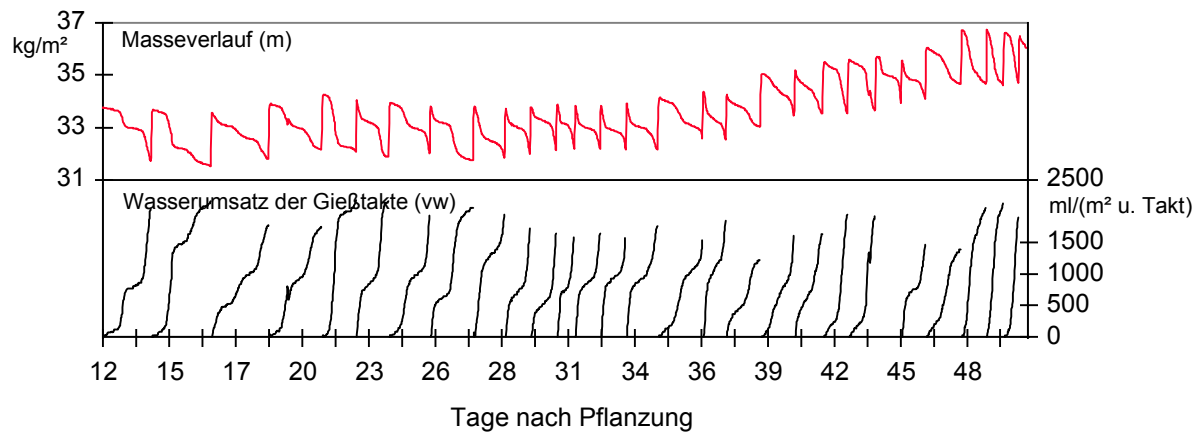


Abb. 4.9: Masseverlauf und errechneter Wasserumsatz der Gießtakte bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I.

Matrixpotentialanstieg (IM)

Das Matrixpotential ist als Integral zu behandeln. Es nimmt mit dem Wasserumsatz zu und fällt während eines Bewässerungsvorganges ab. Der Matrixpotentialanstieg eines Gießtaktes wurde, wie der Wasserumsatz aus dem Masseverlauf, aus dem Matrixpotentialverlauf berechnet (Abb. 4.10).

$$IM = \Psi_M - \Psi_{M_{\min}} \quad F \quad (4.4)$$

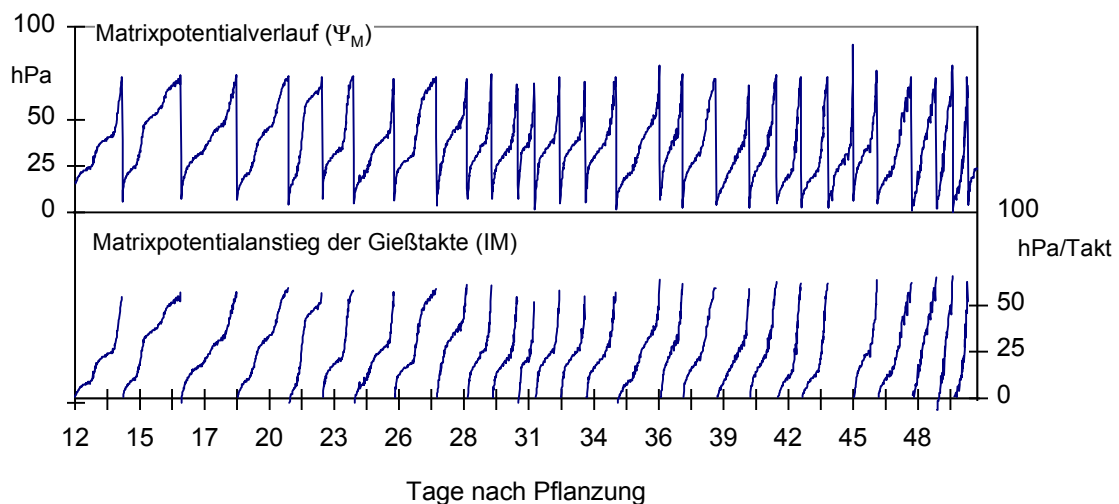


Abb. 4.10: Matrixpotentialverlauf und errechneter Matrixpotentialanstieg (IM) der Gießtakte bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I.

Einstrahlungssumme (IR), Sättigungsdefizitsumme (IS), Dampfdruckdifferenzsumme(ID)

Die Einstrahlungssummen (IR) der Gießakte wurden aus den aktuellen Messwerten der Einstrahlung (Rs) berechnet (Abb. 4.11):

$$IR = \int_{t-1}^t R_s \cdot dt \quad F (4.5)$$

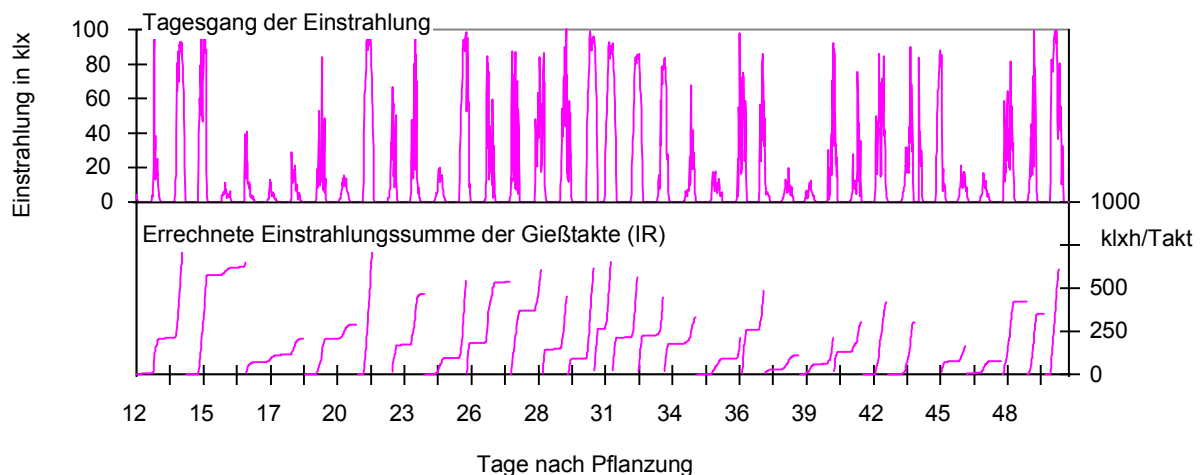


Abb. 4.11: Einstrahlung und errechnete Einstrahlungssummen der Gießakte bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* l.

Die Sättigungsdefizitsummen (IS) und die Dampfdruckdifferenzsummen (ID) der Gießakte wurden aus dem Sättigungsdefizit (Δp_L) und der Dampfdruckdifferenz (Δp_{BL}) nach dem gleichen Verfahren wie die Einstrahlungssumme ermittelt.

Regressionsfunktionen

Die Beurteilung der verschiedenen Faktoren als Führungsgrößen für die Bewässerungssteuerung erfolgt anhand der Regressionsanalysen der einzelnen Gießakte sowie aller Gießakte zusammengefasst. Dabei wurde als Zielgröße der Wasserumsatz (vw) in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs (IM), der Einstrahlungssumme (IR), der Sättigungsdefizitsumme (IS), der Dampfdruckdifferenzsumme (ID) und von Kombinationen mehrerer Faktoren dargestellt. Wenngleich, wie z.B. beim Matrixpotentialanstieg, eine polynomische Regressionsfunktion ein höheres Bestimmtheitsmaß aufweist, wird zum Vergleich mit den klimatischen Parametern der lineare Ansatz ($y=a \cdot x$) verwendet. Die gesamte Auswertung erfolgte mit der Software Excel 4.0 von Microsoft.

4.3 ERGEBNISSE

4.3.1 BODENSPEZIFISCHE PARAMETER

4.3.1.1 WASSERSPEICHERFÄHIGKEIT DES BODENS

Sickerwasserbildung in Abhängigkeit der Bewässerungsmenge

Die Auswirkungen unterschiedlicher Bewässerungsmengen pro Tropfstelle und Bewässerungsvorgang wurde mit *Apium graveolens* I in 10 l Containern untersucht (Versuchsaufbau: Abb. 4.2; Abb-A. 1). Die Gießmenge pro Bewässerungsvorgang wurde bei Variante 1 ab dem 03.05.95 mit 500 und ab 11.07.95 mit 400 ml pro Tropfstelle und Gabe (Abb. 4.12 links) und bei Variante 2 ab dem 05.03.95 mit 600 und ab 11.07.95 mit 500 ml pro Tropfstelle und Gabe (Abb. 4.12 rechts) festgelegt.

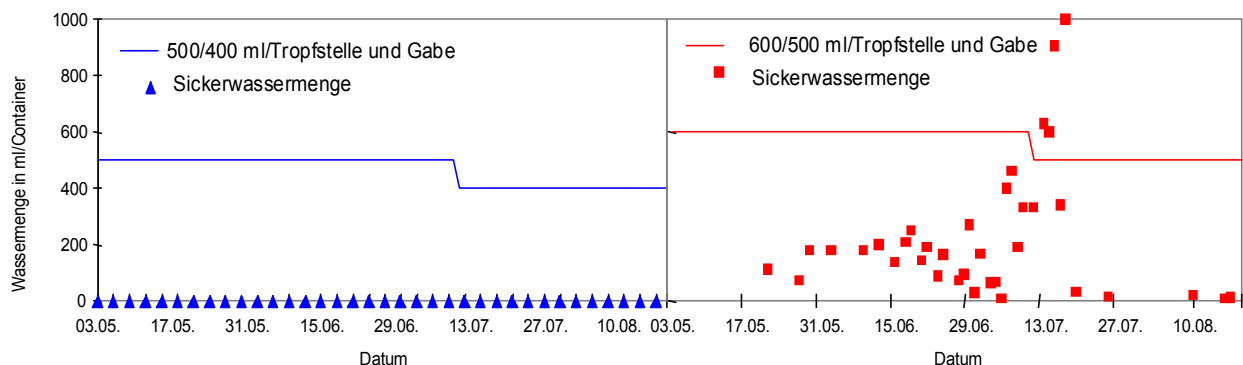


Abb. 4.12: Einfluss der Gießwassermenge pro Tropfstelle und Bewässerungsvorgang bei tensiometergesteuerter Bewässerung (90 hPa) auf die Sickerwassermenge bei sandigem Lehm mit *Apium graveolens* I.

Unter den beschriebenen Bedingungen wurde bei einem Einschaltpunkt von 90 hPa und 500 bzw. 400 ml Wasser pro Tropfstelle und Bewässerungsvorgang (Abb. 4.12 links) kein Sickerwasser festgestellt. Bei einem Einschaltpunkt von 90 hPa und 600 ml Wasser pro Tropfstelle und Bewässerungsvorgang trat regelmäßig Sickerwasser auf. Durch eine Reduzierung der Wassermenge auf 500 ml/Gabe konnte die Wasserversickerung zurückgedrängt bzw. ganz verhindert werden (Abb. 4.12 rechts).

pF-Kurven

Um die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens in Abhängigkeit des Matrixpotentials näher zu untersuchen wurden in einer Gewächshauskultur Bodenproben aus Bodentiefen zwischen (10-20 cm; 30-40 cm und 40-50 cm) entnommen und pF-Kurven bestimmt (Versuchsaufbau: Abb. 4.3).

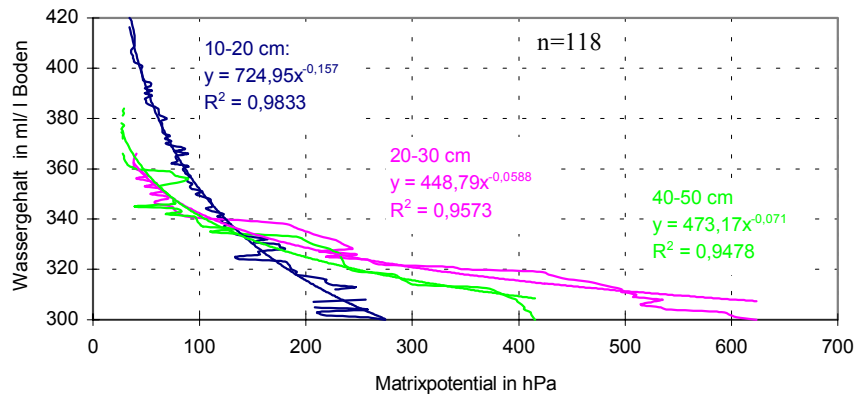


Abb. 4.13: pF-Kurven verschiedener Bodenschichten eines weihenstephaner Gewächshausbodens (sandiger Lehm).

Die pF-Kurven der verschiedenen Bodenschichten zeigen einen unterschiedlichen Verlauf (Abb. 4.13). Zur Berechnung der theoretisch, maximal möglichen, Gießwassermenge in Abhängigkeit des Matrixpotentials wird die Durchschnittskurve (Abb. 4.14) aus den Messreihen der Schichten 0-10, 10-20 und 20-30 cm verwendet.

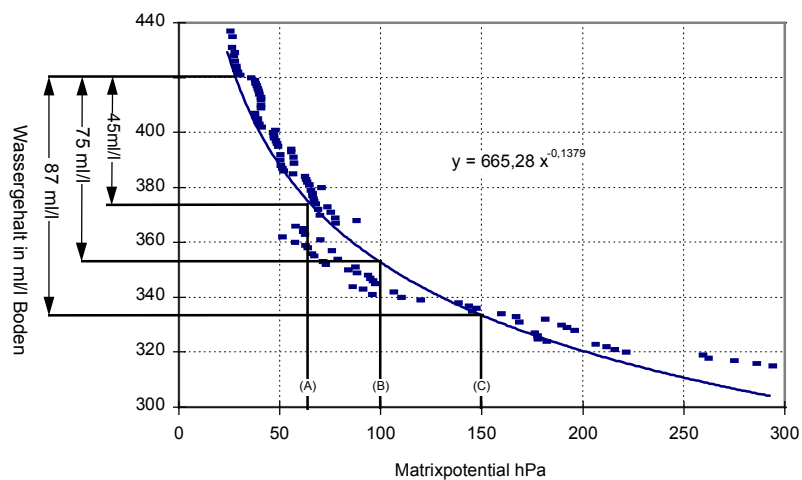


Abb. 4.14: Theoretische Gießwassermenge pro l Bodenvolumen bei unterschiedlichem Matrixpotential der Bodenschicht 0-30 cm (sandiger Lehm).

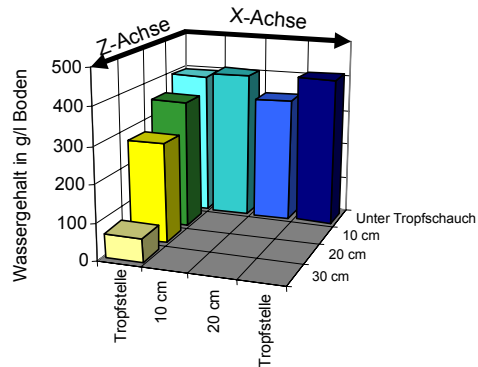
Bei einem Einschaltpunkt von 60 hPa kann bei dem untersuchten Boden pro l Bodenvolumen theoretisch eine Wassermenge von 45 ml gegeben werden, bei 100 hPa 75 ml und bei 150 hPa 87 ml (Abb. 4.14).

Wasserverteilung in und um eine Tropfstelle

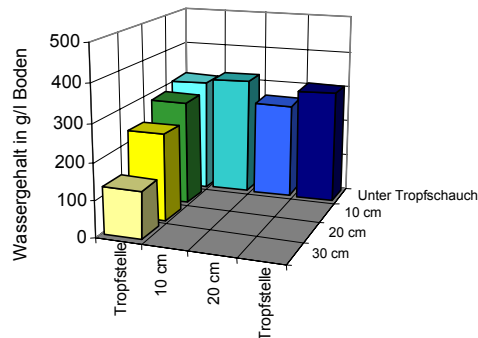
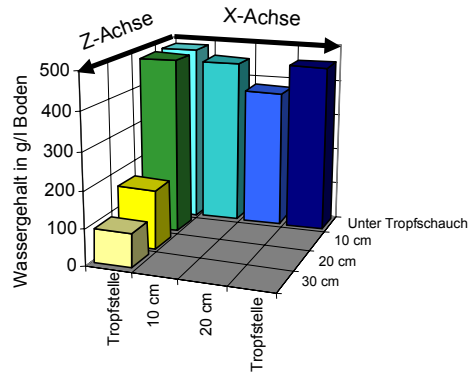
Zur Beschreibung der Feuchteverhältnisse in und um eine Tropfstelle wurden vor und unmittelbar nach einem Bewässerungsvorgang mit einer Gießmenge von 300 ml pro Tropfstelle Bodenproben aus verschiedenen Bodentiefen (Y-Achse) und Abständen parallel (X-Achse) und senkrecht zum Tropf-

schlauch (Z-Achse) (Versuchsanordnung siehe Kap.4.2.3.3) entnommen und der Wassergehalt berechnet (Abb. 4.15).

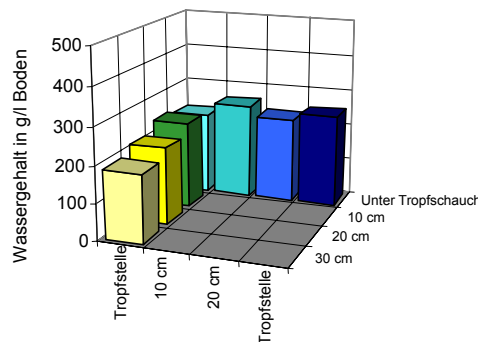
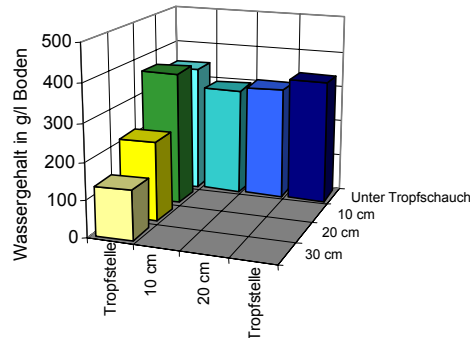
Vor einem Bewässerungsvorgang



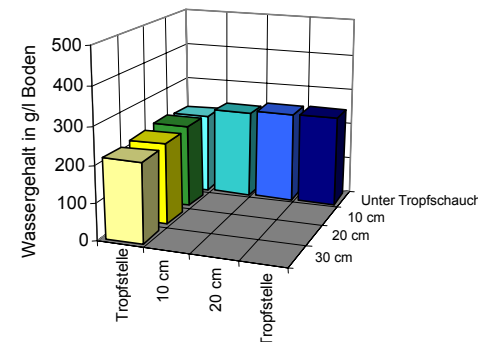
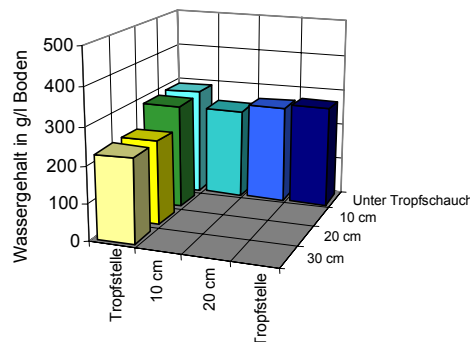
Nach einem Bewässerungsvorgang



10-20 cm



20-30 cm



30-40 cm

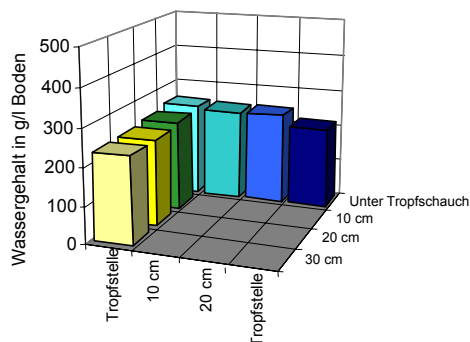


Abb. 4.15: Bodenfeuchteverhältnisse in und um die Tropfstellen vor und nach einem Bewässerungsvorgang mit 300 ml/Tropfstelle und Gabe bei sandigem Lehm.

Sowohl vor als auch nach einem Bewässerungsvorgang sind je nach Abstand zur Tropfstelle in der obersten Bodenschicht 0 bis 30 cm unterschiedliche Wassergehalte vorzufinden. Da in Richtung der Z-Achse (senkrecht zur Tropfstelle) nach Beendigung des Gießvorganges in einem Abstand von 20 cm keine starke Veränderung des Wassergehaltes festzustellen ist, muss angenommen werden, dass sich die verabreichte Wassermenge in einem Radius von ca. 20 cm um die Tropfstelle verteilt. Auch in Y-Achsenrichtung (Messtiefe) ist unterhalb von 20 cm keine starke Veränderung festzustellen. Es wird angenommen, dass das Wasser in den oberen Bodenschichten (0-20 cm) verbleibt. In X-Achsenrichtung (parallel zum Tropfschlauch) waren die Feuchteverhältnisse hoch und relativ gleichmäßig. Hier kommt es zu einer Überschneidung der Wassermengen aus den 2 benachbarten Tropfstellen.

4.3.1.2 EINFLUSS DES MATRIXPOTENTIALS AUF TRANSPIRATION UND ERTRAG

Transpiration und Matrixpotentialanstieg

Inwieweit eine Erhöhung des Matrixpotentials direkten Einfluss auf die Transpiration der Pflanze hat, wurde, da zu diesem Zeitpunkt keine ausreichend großen Gemüsepflanzen vorhanden waren, an einer Zierpflanze (*Zantedeschia aethiopica* L.) untersucht (Versuchsaufbau Kap.4.2.3.4). Unter konstanten Licht- und Luftfeuchteverhältnissen wurde ein Bewässerungsvorgang jeweils bei einem Matrixpotential (Messtiefe 15 cm) von 450 hPa ausgelöst. Das Matrixpotential und die über das Evaporimeter erfasste Transpiration wurden aufgezeichnet (Abb. 4.16). Wie die Ergebnisse zeigen ist bei *Zantedeschia aethiopica* L. in einem Matrixpotentialbereich zwischen 100 und 450 hPa keine Transpirationsminderung festzustellen. Das Bestimmtheitsmaß zwischen dem Matrixpotential und der Transpirationsmenge beträgt 0,0167 (Abb. 4.17).

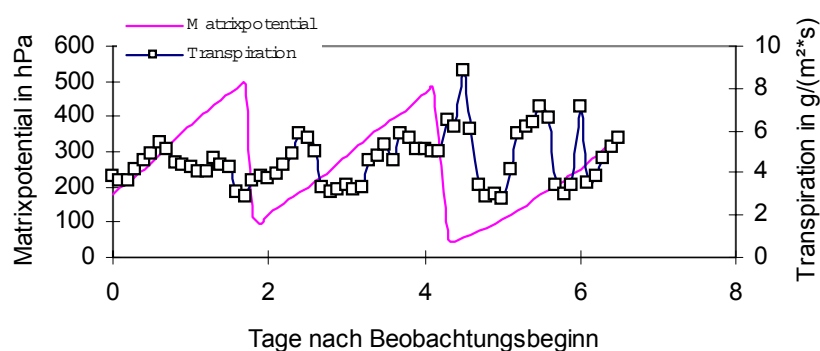


Abb. 4.16: Transpiration und Matrixpotential bei *Zantedeschia aethiopica* L.

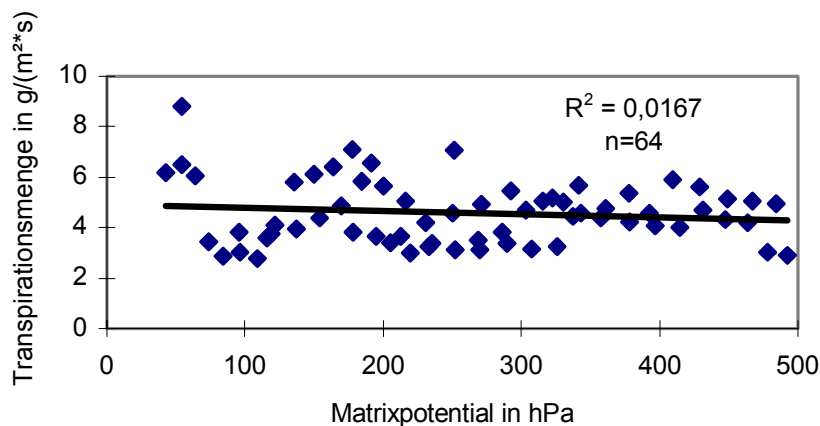


Abb. 4.17: Transpirationsmenge in Abhängigkeit des Matrixpotentials bei *Zantedeschia aethiopica* I.

Matrixpotentialanstieg und Ertrag

Die Auswirkungen verschiedener Einschaltpunkte bei einer tensioschaltergesteuerten Bewässerung auf den Ertrag wurde an *Cucumis sativus* II bei 60 und 150 hPa und bei *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* II und *Capsicum annuum* I bei 90 und 150 hPa untersucht. Aufgrund der pF-Kurve (Abb. 4.14) wurde die Wassermenge pro Bewässerungsvorgang bei den 150 hPa Varianten verdoppelt (Tab. 4.2). Die ausgebrachten Nährstoffmengen wurden gleich gehalten.

Tab. 4.2: Einfluss des Matrixpotentials auf den Ertrag verschiedener Fruchtgemüsearten.

| | Einheit | <i>Cucumis sativus</i> II | | <i>Lycopersicon esculentum</i> var. <i>esculentum</i> II | | <i>Capsicum annuum</i> I | |
|---|---------|---------------------------|------|--|------|--------------------------|-----|
| | | 60 | 150 | 90 | 150 | 90 | 150 |
| Einschaltpunkt (Matrixpotential) | hPa | 60 | 150 | 90 | 150 | 90 | 150 |
| Gießwassermenge pro Tropfstelle und Bewässerungsvorgang | ml/TSt | 300 | 600 | 300 | 600 | 300 | 600 |
| Gesamtwasserverbrauch | l/Pfl | 253 | 284 | 182 | 189 | 113 | 125 |
| Ertrag | kg/Pfl | 17,0 | 15,5 | 9,69 | 9,92 | 3,9 | 3,7 |
| Irrtumswahrscheinlichkeit (F-Test) | % | 24 | | 74 | | 67 | |

Der Gesamtwasserverbrauch war sowohl bei den niedrigeren als auch bei den höheren Einschaltpunkten ähnlich. Eine Erhöhung des Einschaltpunktes von 60 hPa auf 150 hPa bei *Cucumis sativus* II bzw. 90 hPa auf 150 hPa bei *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* II und *Capsicum annuum* I hatte keinen statistisch nachweisbaren Einfluss auf den Ertrag (Tab. 4.2).

4.3.1.3 WASSERUMSATZ IN ABHÄNGIGKEIT DES MATRIXPOTENTIALANSTIEGS

Die Zusammenhänge des Wasserumsatzes in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs wurde an *Lactuca sativa* I und II, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I und *Cucumis sativus* I untersucht (Versuchsaufbau Kap.4.2.3.4). Die Bewässerungssteuerung erfolgte über elektronische Tensiometer bei einem Einschaltpunkt von 40 bis 90 hPa (*Cucumis sativus* I bei 60 hPa). Eventuell auftretendes Überschusswasser wurde registriert. Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge des Wasserumsatzes in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs werden die Regressionsanalysen am Beispiel von *Lactuca sativa* I ausführlich dargestellt. Bei den restlichen Kulturen werden nur die Regressionsfunktionen aller Gießtakte dargestellt bzw. die Ergebnisse der Regressionsanalysen aufgezeigt. Der Wasserumsatz und der Matrixpotentialanstieg der Gießtakte wurde, wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben, berechnet. Bei dem Matrixpotentialanstieg wurde neben der linearen Regressionsfunktion eine polynomische Regressionsfunktion, die ein etwas höheres Bestimmtheitsmaß aufwies und der pF-Kurve des Substrates näher kommt berechnet. Für den Vergleich mit den klimatischen Parametern wird die lineare Regressionsfunktion verwendet.

Bei *Lactuca sativa* I wurden 12 Gießtakte zwischen dem 8. bis 40. Tag nach der Pflanzung ausgewertet (Abb. 4.18).

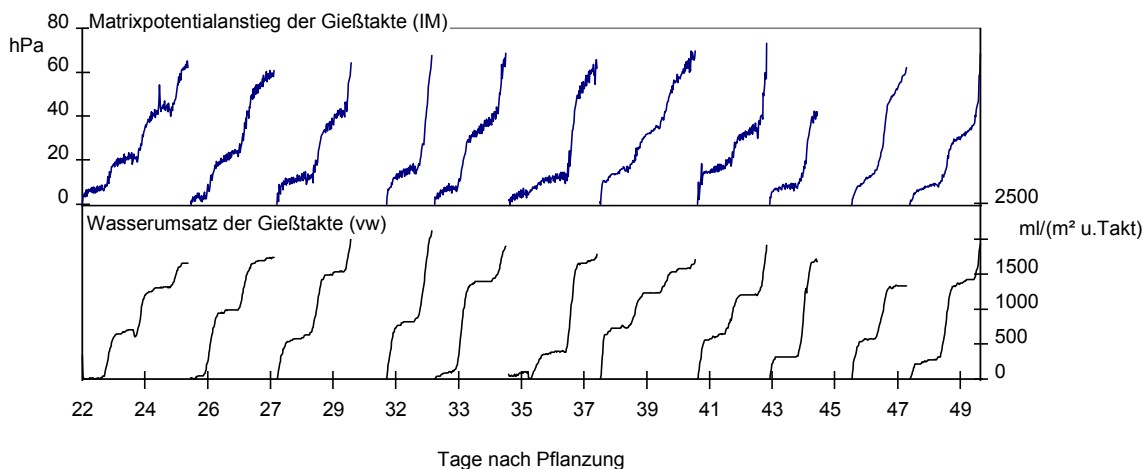


Abb. 4.18: Wasserumsatz und Matrixpotentialanstieg der Gießtakte von *Lactuca sativa* I.

Regressionsanalysen einzelner Gießtakte

Die Regressionsfunktionen der einzelnen Gießtakte zeigen sowohl bei der linearen als auch bei der polynomischen Regressionsfunktion ein hohes Bestimmtheitsmaß (Tab. 4.3, Abb. 4.19). Der Variationskoeffizient der Steigung (a) der Regressionsfunktion des linearen Ansatzes liegt bei 15 %.

Tab. 4.3: Lineare und polynomische Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs bei *Lactuca sativa* I.

| Gießtakt | Beobach- tungen | Polynomischer Ansatz $y=ax^2+bx$ | | | Linearer Ansatz $y=ax$ | |
|---|-----------------------|-------------------------------------|-------|---------|---------------------------|-------|
| | n | a | b | R^2 | a | R^2 |
| Regressionsfunktion der einzelnen Gießtakte | | | | | | |
| 1 | 169 | -0,1172 | 34,95 | 0,96 | 29,60 | 0,95 |
| 2 | 134 | -0,4142 | 53,64 | 0,99 | 33,50 | 0,89 |
| 3 | 120 | -0,3979 | 60,14 | 0,97 | 39,01 | 0,89 |
| 4 | fehlerhafte Messdaten | | | | | |
| 5 | 73 | -0,4417 | 59,90 | 0,98 | 40,49 | 0,77 |
| 6 | 114 | -0,3323 | 50,29 | 0,96 | 35,66 | 0,90 |
| 7 | 142 | -0,1105 | 36,14 | 0,98 | 30,41 | 0,97 |
| 8 | 153 | -0,4404 | 52,77 | 0,97 | 30,17 | 0,57 |
| 9 | 112 | -0,2410 | 40,08 | 0,96 | 35,04 | 0,89 |
| 10 | 77 | -0,2068 | 51,41 | 0,96 | 44,60 | 0,95 |
| 11 | 89 | -0,4782 | 50,37 | 0,98 | 26,83 | 0,74 |
| 12 | 114 | -0,3304 | 52,26 | 0,97 | 39,91 | 0,93 |
| Mittelwert | | -0,3207 | 49,25 | 0,97 | 35,02 | 0,86 |
| Standardabweichung | | 0,1267 | 7,44 | 0,00996 | 5,26 | |
| Variationskoeffizient (%) | | 39,1 | 15,10 | 1,02 | 15,3 | |
| Regressionsfunktion aller Gießtakte | | | | | | |
| 1-12 | 1356 | -0,366 | 49,91 | 0,93 | 33,04 | 0,84 |

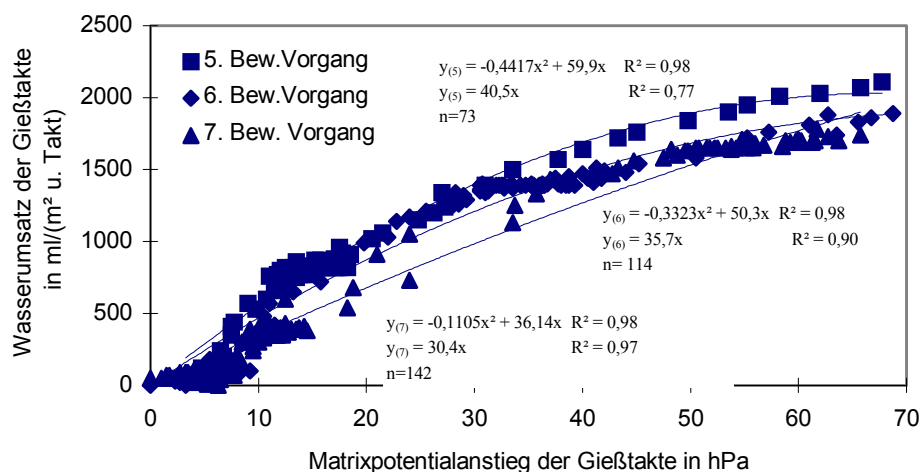


Abb. 4.19: Wasserumsatz einzelner Gießtakte in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs mit linearer und polynomischer Regressionsfunktion bei *Lactuca sativa* I.

Wasserumsatz eines Gießtaktes

Wie sich an einem ausgewählten Gießtakt von *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I deutlich zeigt, wird sowohl tagsüber als auch nachts der Wasserumsatz durch den Matrixpotentialanstieg wiedergegeben (Abb. 4.20).

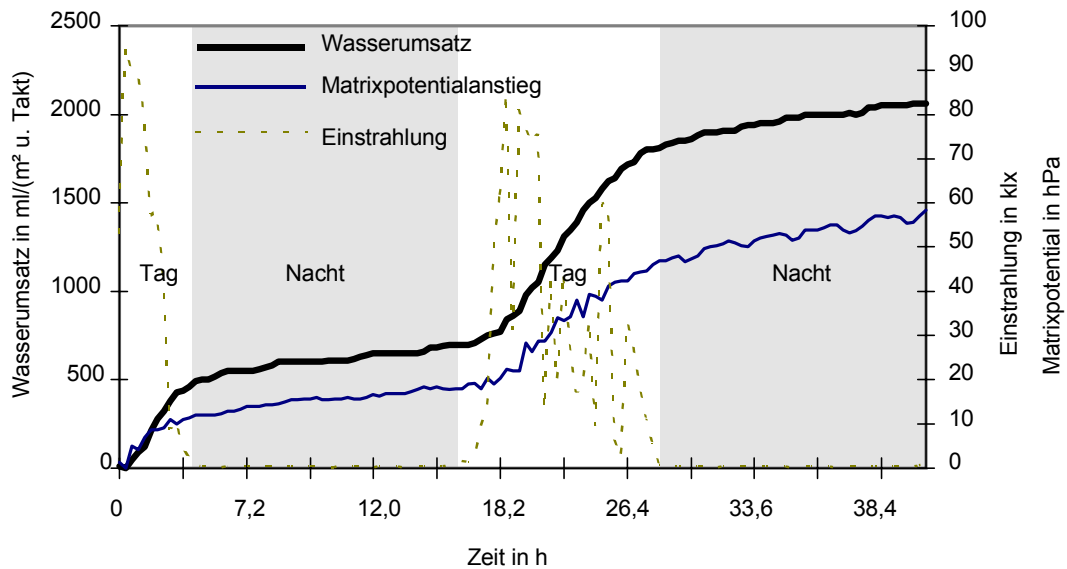
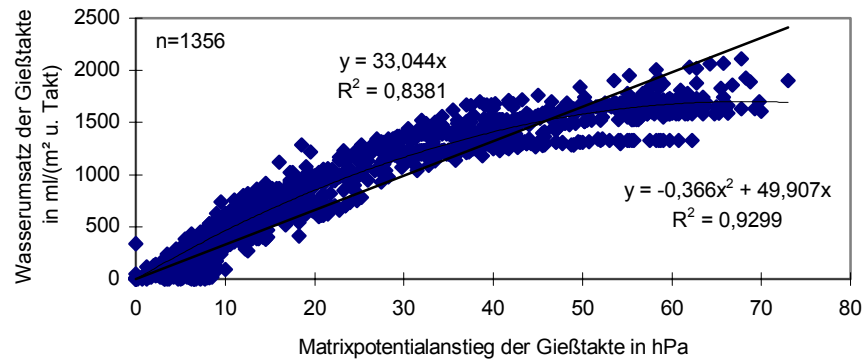


Abb. 4.20: Zeitlicher Verlauf des Wasserumsatzes, Matrixpotentialanstiegs und der Einstrahlung bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I (9. Gießtakt).

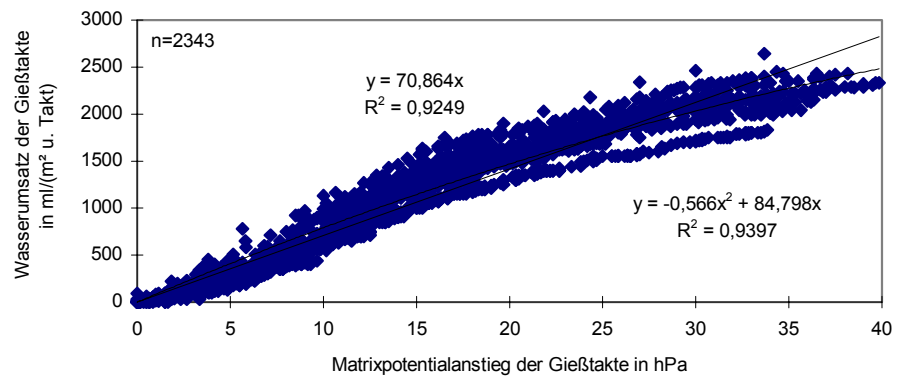
Regressionsfunktion aller Gießtakte

Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionsfunktion aller Gießtakte war bei *Lactuca sativa* I 0,84, bei *Lactuca sativa* II 0,93, bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I 0,90 und *Cucumis sativus* I 0,90 (Abb. 4.21).

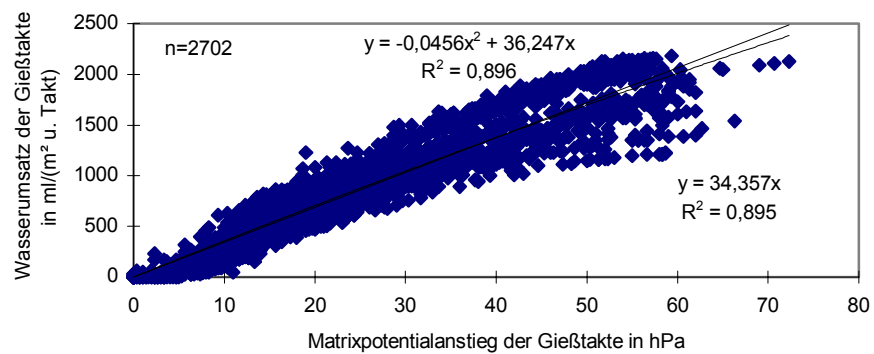
Lactuca sativa I



Lactuca sativa II



Brassica oleracea
var. *gongylodes* I



Cucumis sativus I

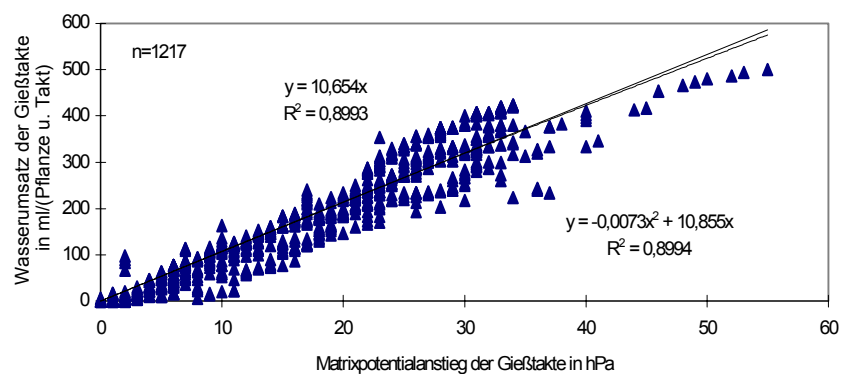


Abb. 4.21: Wasserumsatz aller Gießtakte in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs mit linearer und polynomischer Regressionsfunktion.

Übersicht des Wasserumsatzes in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs verschiedener Gemüsearten

Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionsfunktionen der einzelnen Gießtakte lag bei den einzelnen Gemüsearten zwischen 0,86 und 0,96. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion aller Gießtakte war 0,84 bis 0,93. Die Variationskoeffizienten der Steigung (a) der Regressionsgeraden ($y=ax$) lagen zwischen 2 % und 14 % (Tab. 4.4). Die unterschiedlichen Steigungen der Regressionsfunktion aller Gießtakte von *Lactuca sativa* I und II sind damit begründet, dass unterschiedliche Einschaltpunkte (80 hPa und 40 hPa) gewählt wurden. In dem gesamten Versuchszeitraum ist bei keiner Kultur Überschusswasser festgestellt worden.

Tab. 4.4: Statistische Parameter zur Beurteilung des Matrixpotentials als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung bei *Lactuca sativa*, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* und *Cucumis sativus*.

| | <i>Lactuca sativa</i> I | <i>Lactuca sativa</i> II | <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I | <i>Cucumis sativus</i> I |
|---|----------------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| Regressionsfunktion | $y=ax$ d.h. $vw=a_{IM}$ IM | | | |
| Wasserumsatz (y) in | ml/m ² | ml/m ² | ml/m ² | ml/Pflanze |
| Ausgewertete Gießtakte | 11 | 18 | 29 | 9 |
| Parameter der Regressionsfunktionen der einzelnen Gießtakte | | | | |
| R^2 (Mittelwert) | 0,86 | 0,96 | 0,93 | 0,95 |
| Variationskoeffizient von a | 13,32 | 10,24 | 13,71 | 1,56 |
| Parameter der Regressionsfunktionen aller Gießtakte | | | | |
| Regressionsfunktion | $y=33,04x$ | $y=70,86x$ | $y=34,38x$ | $y=10,65x$ |
| N | 1356 | 2343 | 2702 | 1217 |
| R^2 | 0,84 | 0,93 | 0,90 | 0,90 |

4.3.2 PFLANZLICHE PARAMETER

4.3.2.1 BLATTFLÄCHE

Da eine direkte, zerstörungsfreie Bestimmung der Blattfläche in einem Pflanzenbestand nicht möglich ist, muss diese, sofern sie in Transpirationsmodellen berücksichtigt werden soll, modelliert werden. Dazu wurde der Zusammenhang zwischen einfachen, während der Kultur zu messende Größen wie z.B. Pflanzenhöhe, Laublänge, Frischmasse und Kulturtag untersucht. Welcher Parameter für die Modellierung der Blattfläche geeignet ist, wurde an *Lactuca sativa* I und III *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I und *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* I geprüft.

Zur Ermittlung der Regressionsfunktionen wurden aus dem Bestand in regelmäßigen Abständen 3 bis 5 Pflanzen entnommen und deren Gesamtblattfläche, Anzahl Blätter, Laublänge sowie die Frischmasse bestimmt. Zur Bestimmung der Blattfläche wurden die einzelnen Pflanzen zerlegt und die Blätter auf ein Blattflächenmessgerät gelegt (Tab-A 14).

Blattflächenentwicklung

Brassica oleracea var. *gongylodes* hat z.B. im Vergleich zu *Lactuca sativa* eine sehr lockere Blattstellung. Hier kann die gesamte Blattfläche weitestgehend als aktive Transpirationsfläche angesehen werden. Seine Blattfläche nahm vom Zeitpunkt der Pflanzung (147 cm²/Pflanze) bis zur Ernte (1630 cm²/Pflanze) um den Faktor 11 zu, die Laublänge, gemessen von der Oberkante Knolle bis zur längsten Blattspitze, von 20 auf 42 cm (Tab. 4.5).

Tab. 4.5: Blattflächenentwicklung bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I.

| Datum | Tage nach Pflanzung | Laublänge ¹⁾ in cm | Laubmasse in g | Gesamtblattfläche in cm ² | Anzahl Blätter ²⁾ in Stück | Knollenmasse in g |
|----------|---------------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| 10.02.95 | 15 | 20 | 5,3 | 147 | 6 | ³⁾ |
| 20.02.95 | 25 | 22 | 20,9 | 450 | 9 | ³⁾ |
| 24.02.95 | 29 | 23 | 31,9 | 571 | 8 | ³⁾ |
| 03.03.95 | 36 | 29 | 40,9 | 846 | 8 | 17,1 |
| 10.03.95 | 43 | 32 | 52,9 | 989 | 9 | 37,2 |
| 17.03.95 | 50 | 38 | 79,2 | 1439 | 10 | 68,8 |
| 24.03.95 | 57 | 40 | 82,0 | 1534 | 11 | 114,0 |
| 30.03.95 | 63 | 42 | 95,3 | 1630 | 12 | 183,7 |

¹⁾ vom Knollenansatz bis zur Spitze des längsten Blattes ²⁾ insgesamt vorhandene Blattansätze ³⁾ nicht vorhanden

Sowohl die Blattmasse als auch der Kulturtag und die Laublänge zeigen bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I ein hohes Bestimmtheitsmaß zur Blattflächenentwicklung (Abb. 4.22).

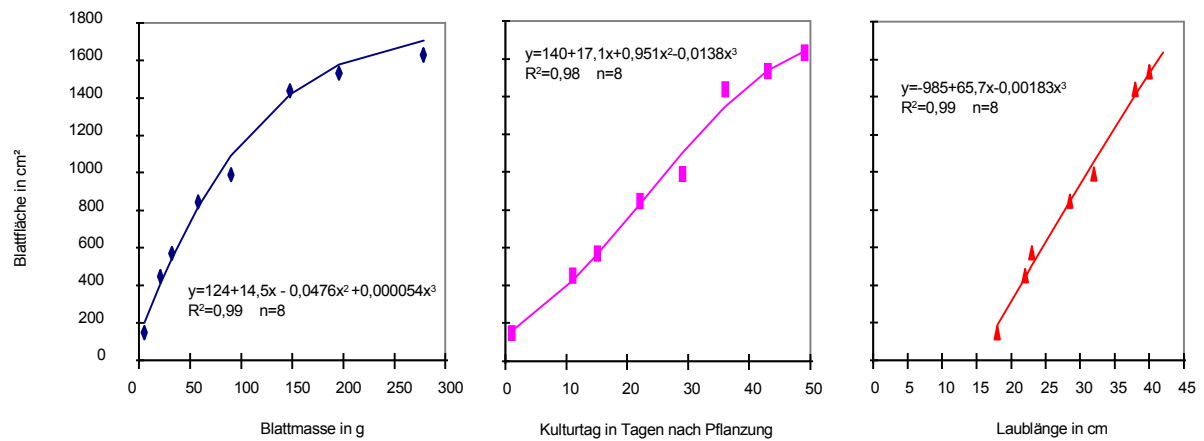


Abb. 4.22: Blattfläche in Abhängigkeit der Blattmasse (links), des Kulturtages (mitte) und der Laublänge (rechts) bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I.

Lactuca sativa hat zu Kulturbeginn einen sehr lockeren Aufbau. Bei einsetzender Kopfbildung werden die inneren Blätter von den äußern umschlossen. Vom Pflanzzeitpunkt bis zur Ernte nahm die Blattfläche von 245 cm²/Pflanze auf 4550 cm²/Pflanze um den Faktor 18,6 und die Frischmasse von 5,1 g/Pflanze auf 361 g/Pflanze um den Faktor 71 zu (Tab. 4.6).

Tab. 4.6: Blattflächenentwicklung bei *Lactuca sativa* I.

| Datum | Tage nach Pflanzung | Frischmasse in g | Blattfläche in cm² | Durchmesser in cm | Höhe in cm | Blätter in Stück |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------------|---------------|------------------|
| 10.02.95 | 1 | 5,1 | 245 | ²⁾ | ²⁾ | 9 |
| 20.02.95 | 11 | 14,2 | 494 | ²⁾ | ²⁾ | 12 |
| 24.02.95 | 15 | 20,6 | 647 | ²⁾ | ²⁾ | 14 |
| 03.03.95 ¹⁾ | 22 | 48,6 | 1177 | ²⁾ | ²⁾ | 18 |
| 10.03.95 | 29 | 85,2 | 1645 | 26 | 10 | 24 |
| 17.03.95 | 36 | 135,0 | 2400 | 30 | 11 | 24 |
| 24.03.95 | 43 | 239,0 | 3723 | 32 | 11 | 33 |
| 30.03.95 | 49 | 361,0 | 4550 | 33 | 13 | 40 |

¹⁾ einsetzende Kopfbildung ²⁾ zu diesem Zeitpunkt nicht erfasst

Das Bestimmtheitsmaß der Blattfläche in Abhängigkeit des Kulturtages sowie dem Frischgewicht war bei *Lactuca sativa* I über 0,98 (Abb. 4.23).

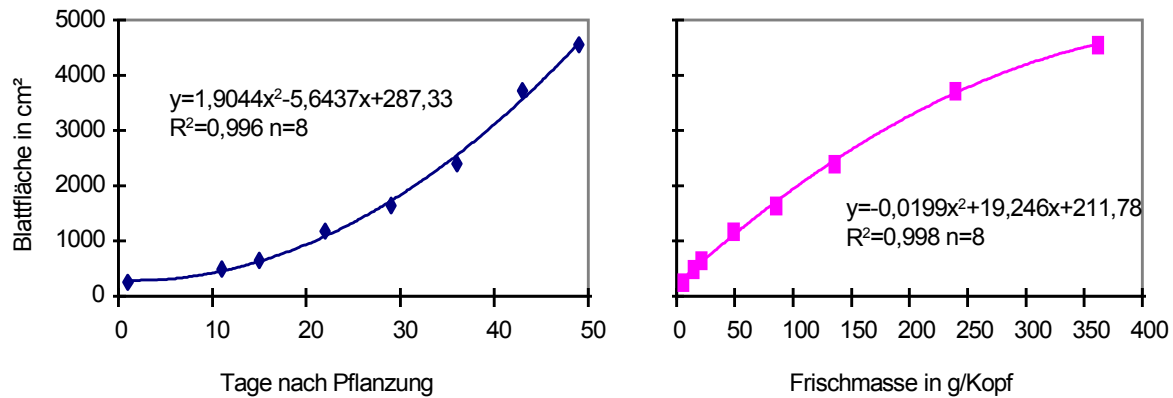


Abb. 4.23: Blattfläche in Abhängigkeit des Kulturtages (links) und der Frischmasse (rechts) bei *Lactuca sativa* I.

Als Vertreter für Fruchtgemüse wurde die Blattfläche von *Lycopersicon esculentum* var. *esc.* I untersucht. Aufgrund der Aussagekraft der Abbildung (Abb. 4.24) wurde auf eine tabellarische Darstellung verzichtet. Das Bestimmtheitsmaß der Blattfläche in Abhängigkeit der Kulturzeit sowie der Pflanzhöhe lag über 0,96 (Abb. 4.24).

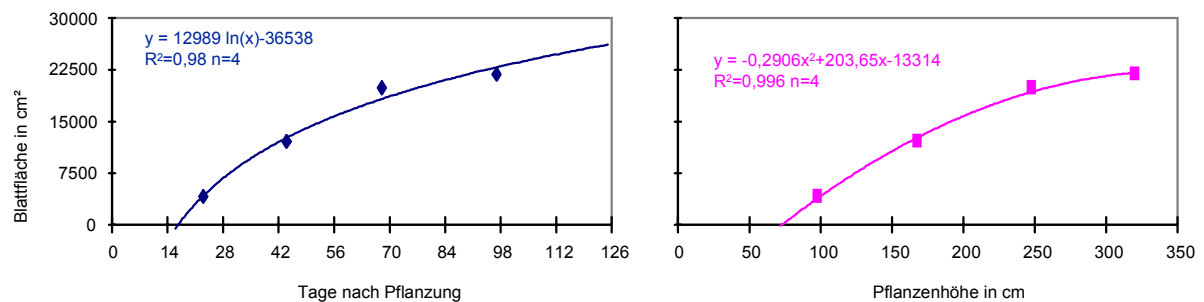


Abb. 4.24: Blattflächenentwicklung bei *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* I in Abhängigkeit der Kulturzeit (Tage nach Pflanzung) und der Pflanzhöhe.

Bei *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* und auch bei anderen Fruchtgemüsearten (*Cucumis sativus*, *Capsicum annuum*) ist zu berücksichtigen, dass die Blattfläche während der Kulturzeit durch Pflegemaßnahmen vermindert wird.

Blattflächenentwicklung in Abhängigkeit der Sorte

Da das Erscheinungsbild von Sorten oft unterschiedlich ist, wurde bei *Lactuca sativa* III die Sortenabhängigkeit der Blattflächenentwicklung untersucht. Dazu wurden zum Erntezeitpunkt von 4 Sorten die Köpfe zerlegt und die Gesamtblattfläche bestimmt (Abb. 4.25).

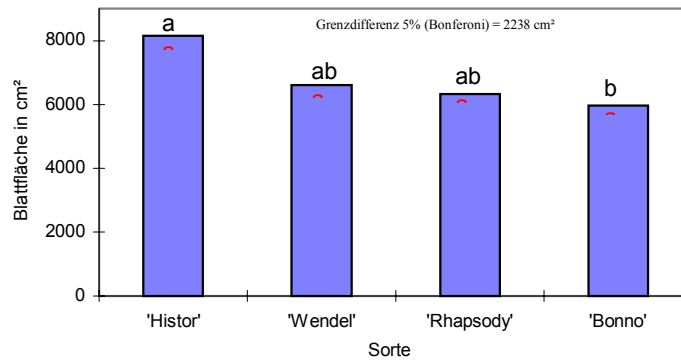


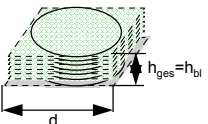
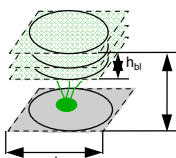
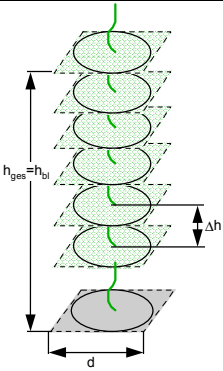
Abb. 4.25: Blattfläche zum Erntezeitpunkt verschiedener Sorten *Lactuca sativa* III.

Die Differenzen der Blattfläche sind genetisch durch die Sorte bedingt und statistisch absicherbar.

Blattflächenindex

Je nach Gemüseart sind die Pflanzdichten, die Blattflächen und der Blattflächenindex unterschiedlich. Der zur Beschreibung der Blattfläche in verschiedenen Transpirationsmodellen verwendete Blattflächenindex (LAI; Leaf Area Index) lässt keine Aussage über die Abstände der Blätter zueinander und damit einer gegenseitigen Transpirationsbeeinflussung der Blätter zu. Zur Darstellung dieses Problems wurden die theoretischen Lagerungsdichten der Blattschichten bei drei verschiedenen Gemüsearten berechnet (Tab. 4.7). Der Vergleich des LAI von *Lactuca sativa* I (7,28) und *Lycopersicon esculentum* var. *esc.* I (10,8) verdeutlicht, dass bei einem ähnlichen LAI eine unterschiedliche Gesamtblattfläche und Lagerungsdichte vorliegt. Die theoretischen Schichtabstände sind bei *Lactuca sativa* I 1,8 cm und bei *Lycopersicon esculentum* var. *esc.* I 29,6 cm. Bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I ergab sich ein LAI von 2,6 bei einer Gesamtblattfläche von 1630 cm². Der theoretische Schichtabstand beträgt 8,5 cm.

Tab. 4.7: Blattfläche, Wuchshöhe, Blattflächenindex bei verschiedenen Gemüsearten.

| | | <i>Lactuca sativa</i> I | <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I | <i>Lycopersicon esculentum</i> var. <i>esculentum</i> I |
|------------------------------|------------------|---|--|---|
| Reihenabstand | | 25 cm | 25 cm | 115 bzw. 75 cm |
| Abstand i.d.Reihe | | 25 cm | 25 cm | 45 cm |
| Pflanzdichte | Netto | 16 Pfl/Nm ² | 16 Pfl/Nm ² | -- |
| | Brutto | 13,9 Pfl/Bm ² | 13,9 Pfl/Bm ² | 2,3 Pfl/Bm ² |
| Belegte Grundfl. | d | 25 cm | 25 cm | 45 cm |
| | A | 625 cm ² | 625 cm ² | 2025 cm ² |
| Wuchshöhe | h_{ges} | 13 cm | 42 cm | 320 cm |
| | h_{bl} | 13 cm | 22 cm | 320 cm |
| | |  |  |  |
| Blattfläche | | 4550 cm ² | 1630 cm ² | 21892 cm ² |
| Blattflächenindex | LAI | 7,28 | 2,6 | 10,8 |
| theoretischer Schichtabstand | Δh | 1,8 cm | 8,5 cm | 29,6 cm |

Wasserumsatz in Abhängigkeit des Blattflächenindex

Bei *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* I wurde festgestellt, dass der Wasserumsatz nicht linear mit dem Blattflächenindex zunimmt (Abb. 4.26).

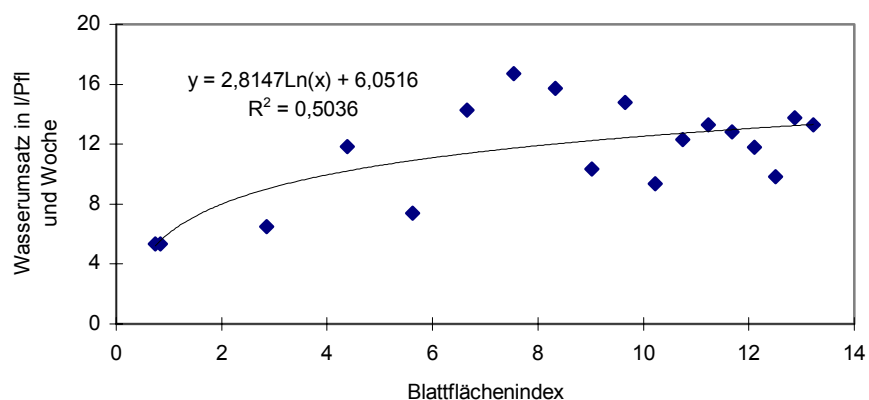


Abb. 4.26: Wasserumsatz pro Pflanze und Woche in Abhängigkeit des Blattflächenindex bei *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* I.

Der Wasserumsatz pro Blattfläche und Zeiteinheit nimmt mit der Kulturzeit ab (Abb. 4.27). Diese Erscheinung kann auf eine gegenseitige Beschattung der Blattflächen und Alterung der Blätter zurückgeführt werden.

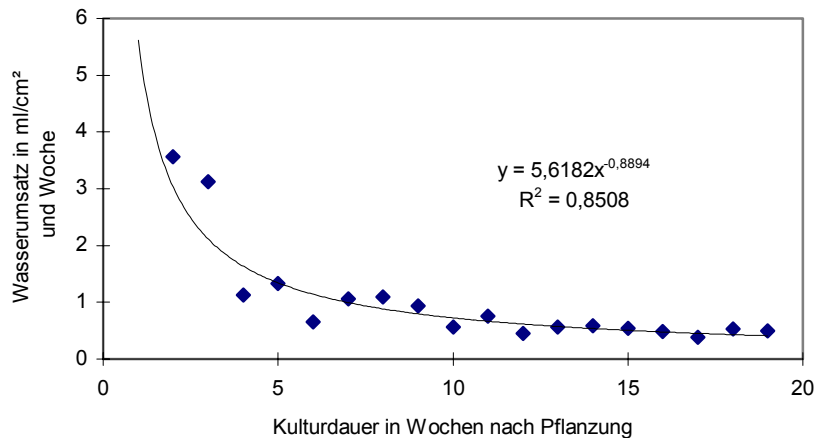


Abb. 4.27: Wasserverbrauch pro cm² Blattfläche und Woche in Abhängigkeit der Kulturdauer bei *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* I.

4.3.2.2 BLATTTEMPERATUR

Messverfahren

Die Blattemperaturmessung wurde zur Berechnung der Dampfdruckdifferenz (Kap. 4.4.1) verwendet. Zunächst wurde mit Kontaktthermometern (Tab-A 14) gearbeitet. Aufgrund der Wachstumsbewegungen der Blätter, durch Wind und Erntearbeiten kam es häufig zu Störungen der Messsignale. Auch wurden die Blätter teilweise von den Sensoren durchstoßen (Abb.-A 6), so dass keine sichere und langfristig zuverlässige Messung möglich war.

Ein später eingesetzter, berührungslos messender Infrarot-Sensor (Abb.-A 5) war aufgrund seiner Größe schwierig zu fixieren, lieferte jedoch ohne Zerstörung der Blattfläche stabile und reproduzierbare Messwerte.

Messort

Bei der Suche nach einem geeigneten Messort zeigte sich, dass erhebliche Temperaturunterschiede auf ein und demselben Blatt vorhanden sind. Durch eine gegenseitige Abschirmung der Blattflächen und der Stellung zur einstrahlenden Sonne wurden bei *Lactuca sativa* I Abweichungen von $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ und bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I $\Delta T = 8^{\circ}\text{C}$ gemessen (Abb. 4.28).

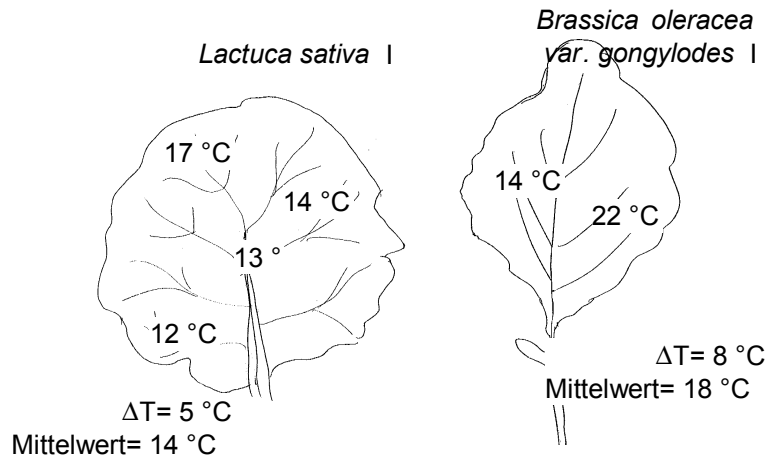


Abb. 4.28: Temperaturverteilung auf einem Blatt von *Lactuca sativa* I (links) und *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I (rechts) an einem sonnigen Tag (03.02.1995, 10.00 Uhr).

Die Auswirkungen der Blattoberflächentemperatur auf die Dampfdruckdifferenz wird in Abb. 4.29 dargestellt.

Bei einer Lufttemperatur von 18 °C, einer Luftfeuchte von 80 % und einer Blattoberflächentemperatur von 18 °C ist eine Dampfdruckdifferenz von 0 hPa vorhanden. Weicht die Blattoberflächentemperatur um 1 °C von der Lufttemperatur ab ändert sich die Dampfdruckdifferenz um 30 % (Abb. 4.29).

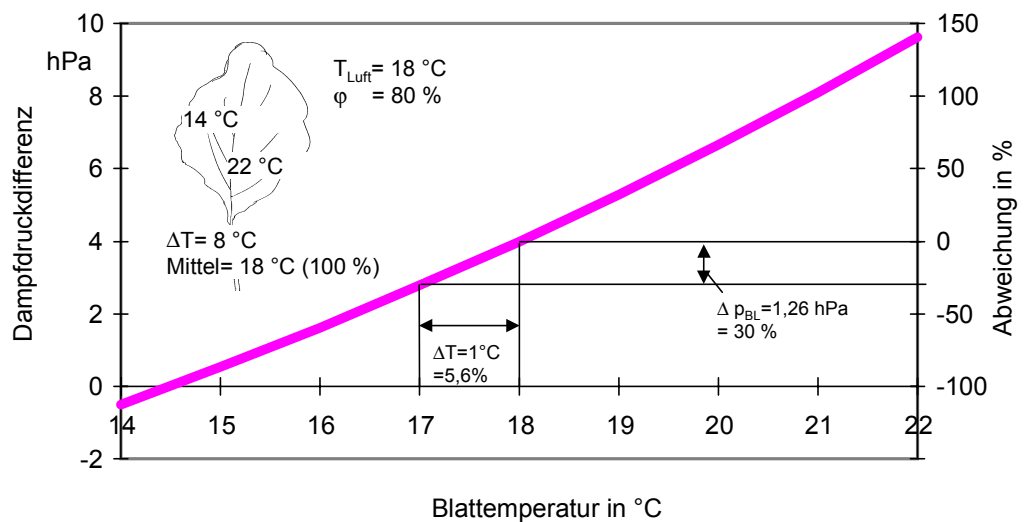


Abb. 4.29: Auswirkungen verschiedener Blattoberflächentemperaturen (Oberflächentemperatur) auf die Dampfdruckdifferenz aufgrund der Ergebnisse wie in Abb. 4.28 dargestellt bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I.

Wie in Kap 4.3.4 und Kap 4.4.2 beschrieben, ist aufgrund der Verdunstungskälte mit einer Abkühlung der Blattoberfläche zu rechnen. Während tagsüber 65 % der Blattoberflächentemperaturmesswerte unter denen der Lufttemperaturen lagen wurde nachts höhere Werte festgestellt (Abb. 4.30).

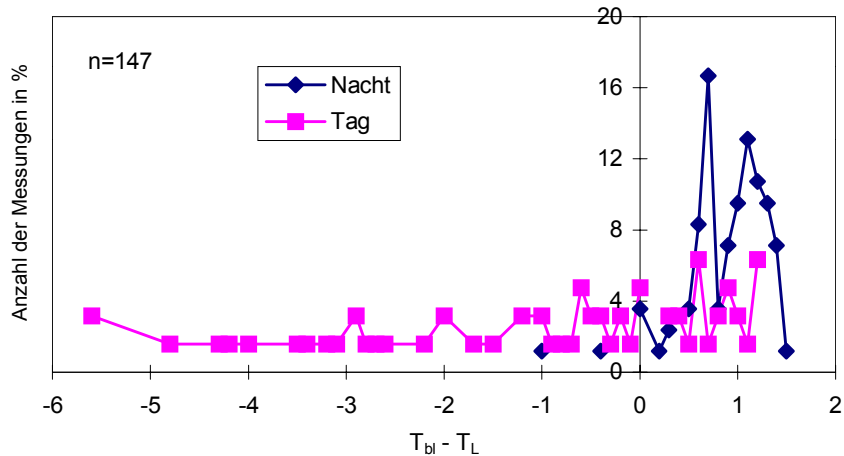


Abb. 4.30: Häufigkeitspolygon der Differenz von Blatt- und Lufttemperatur ($T_{bi} - T_L$) bei Tag und Nacht (*Lactuca sativa* II, 58.-61. Tag nach der Pflanzung).

4.3.3 WASSERUMSATZ IN ABHÄNGIGKEIT DER KLIMATISCHEN PARAMETER

4.3.3.1 EINSTRAHLUNGSSUMME

Zur Darstellung des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme wurden die gleichen Messwerte wie in den Versuchen zum Matrixpotentialanstieg (Kap 4.3.1.3) verwendet. Die Einstrahlungssummen wurden aus den außerhalb des Gewächshauses über ein Luxmeter erfassten Messwerte für die einzelnen Gießtakte berechnet (Kap. 4.2.4).

Für die ausführliche Darstellung der Einzelergebnisse wurde *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I ausgewählt. Es wurden 29 Gießtakte berücksichtigt. Der Verlauf der Einstrahlungssummen und die zum nächsten Gießtakt erreichten Maxima sind sehr unterschiedlich (Abb. 4.31).

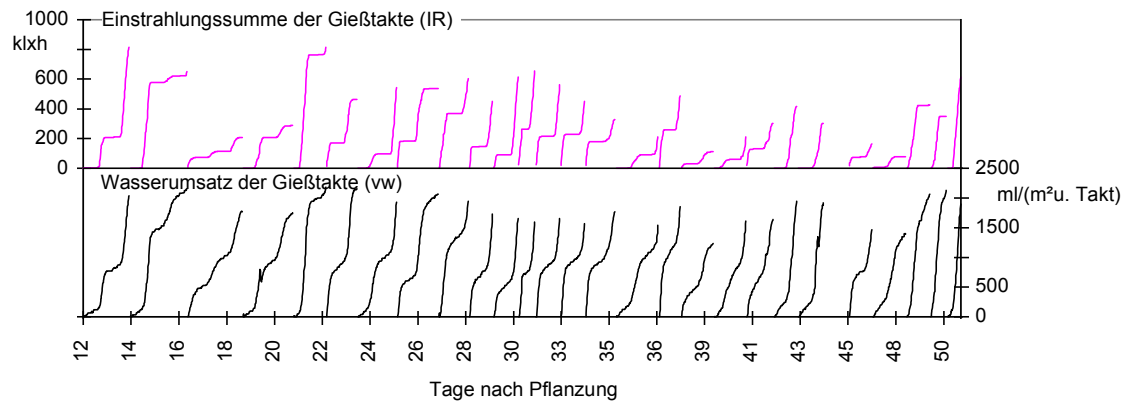


Abb. 4.31: Wasserumsatz und Einstrahlungssummen der Gießtakte bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* l.

Regressionsfunktionen einzelner Gießtakte

Die Regressionsfunktionen der einzelnen Gießtakte haben bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* l ein Bestimmtheitsmaß zwischen 0,44 und 0,97. Das Bestimmtheitsmaß aller Gießtakte zusammengefasst ist 0,55. Der Variationskoeffizient der Steigung (a) der Regressionsfunktionen liegt bei 57% (Tab. 4.8).

Tab. 4.8: Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* l.

| Gießtakt | n | a | R ² | Gießtakt | n | a | R ² |
|--|-------------------------|------|----------------|----------|-------------------------|-----------------------|----------------|
| Regressionsfunktion (y=ax) der einzelnen Gießtakte | | | | | | | |
| 1 | fehlerhafte Messsignale | | | 16 | 92 | 5,16 | 0,88 |
| 2 | 145 | 2,83 | 0,90 | 17 | 131 | 10,29 | 0,89 |
| 3 | 178 | 2,88 | 0,93 | 18 | 67 | 4,01 | 0,90 |
| 4 | 171 | 7,93 | 0,93 | 19 | 100 | 11,27 | 0,94 |
| 5 | 156 | 5,06 | 0,92 | 20 | 99 | 10,63 | 0,87 |
| 6 | 101 | 2,53 | 0,98 | 21 | 82 | 5,11 | 0,82 |
| 7 | 96 | 4,39 | 0,96 | 22 | 71 | 4,44 | 0,95 |
| 8 | 122 | 5,34 | 0,44 | 23 | 79 | 6,89 | 0,83 |
| 9 | 128 | 3,51 | 0,97 | 24 | fehlerhafte Messsignale | | |
| 10 | 93 | 3,36 | 0,95 | 25 | 71 | 9,11 | 0,87 |
| 11 | 73 | 4,10 | 0,83 | 26 | 103 | 15,27 | 0,92 |
| 12 | 77 | 3,32 | 0,66 | 27 | 73 | 3,77 | 0,80 |
| 13 | 51 | 2,52 | 0,94 | 28 | 50 | 5,37 | 0,96 |
| 14 | 75 | 3,50 | 0,81 | 29 | 41 | 2,97 | 0,99 |
| 15 | 74 | 3,89 | 0,85 | | | | |
| | | | | | | Mittelwert | 5,28 |
| | | | | | | Standardabweichung | 3,15 |
| | | | | | | Variationskoeffizient | 56,93 |
| Regressionsfunktion (y=ax) aller Gießtakte | | | | | | | |
| Gießtakt 1-29 | | | | | 2702 | 3,50 | 0,55 |

Bei den Zahlenreihen der einzelnen Gießtakte (z.B. des 9. 16. und 21.) ist zu erkennen, dass sie sich teilweise von der Regressionslinie stark entfernen (Abb. 4.32).

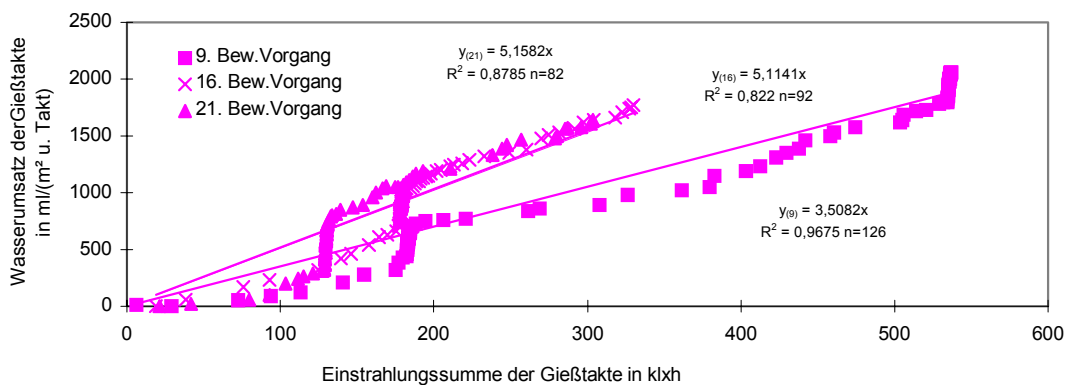


Abb. 4.32: Wasserumsatz einzelner Gießtakte in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I.

Wasserumsatz eines Gießtaktes

Untersuchungen des 9. Gießtaktes bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I zeigen, dass der Wasserverbrauch während der Nachtstunden ($\Delta v_w = 210 \text{ ml/m}^2$) nicht durch die Einstrahlungssumme erfasst wird ($\Delta I_R = 0$) (Abb. 4.33).

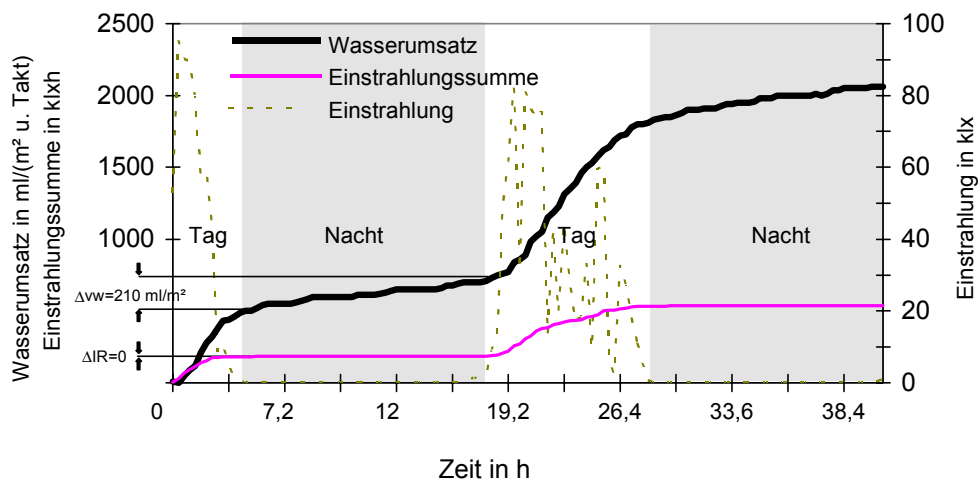
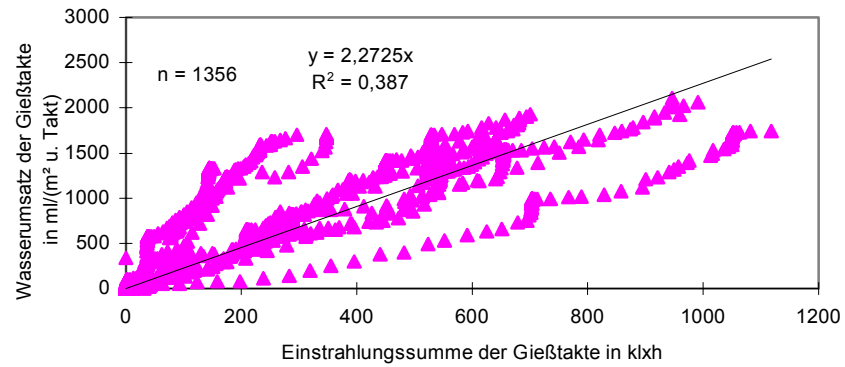


Abb. 4.33: Zeitlicher Verlauf des Wasserumsatzes, Einstrahlungssumme und Einstrahlung bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I (9. Gießtakt).

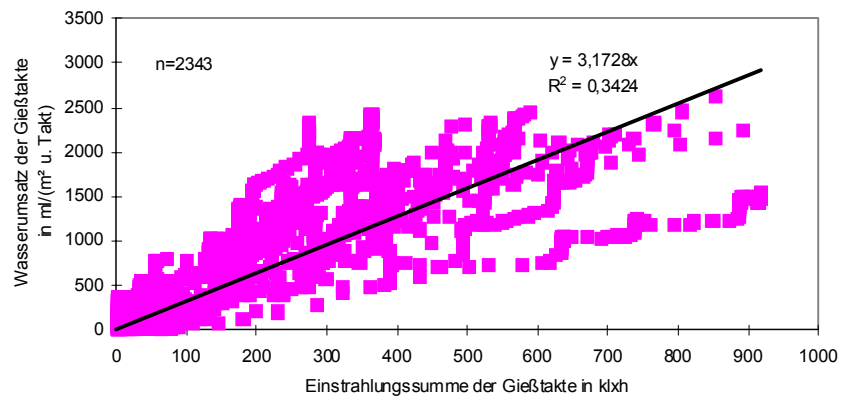
Regressionsfunktionen aller Gießtakte

Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionsfunktion aller Gießtakte war bei *Lactuca sativa* I 0,39, bei *Lactuca sativa* II 0,34, bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I 0,55 und *Cucumis sativus* I – 0,15 auf (Abb. 4.34).

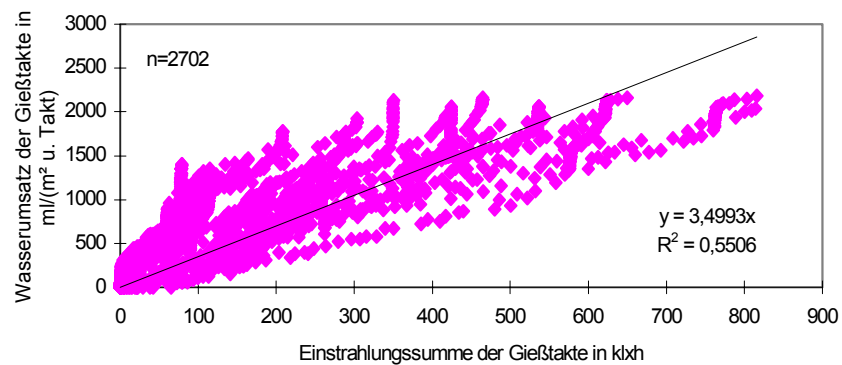
Lactuca sativa I.



Lactuca sativa II.



Brassica oleracea
var. *gongylodes* I.



Cucumis sativus I.

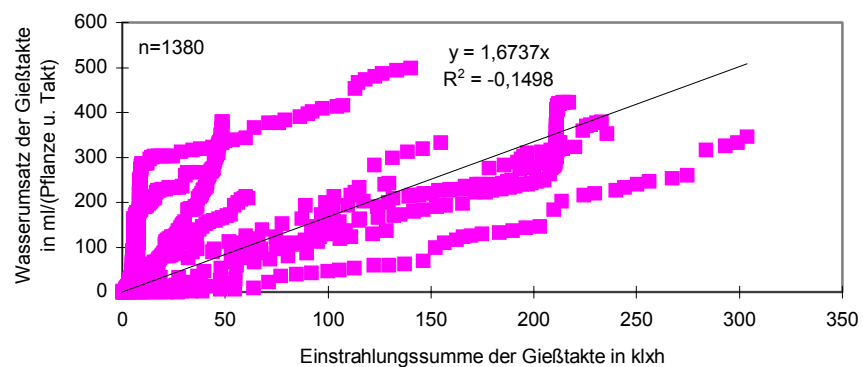


Abb. 4.34: Wasserumsatz aller Gießakte in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme bei verschiedenen Gemüsearten.

Einstrahlungssumme in Abhängigkeit der Kulturdauer

In der Darstellung (Abb. 4.34) des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme aller Gießtakte sind einzelne Gießtakte deutlich zu erkennen. Aufgrund der Pflanzenentwicklung ist zu vermuten, dass sich die Steigung der Geraden der einzelnen Gießtakte bzw. die erreichte Einstrahlungssumme zum Bewässerungszeitpunkt mit der Kulturdauer verändert. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsanalysen der Einstrahlungssumme in Abhängigkeit des Kulturtages war bei *Lactuca sativa* I 0,42, bei *Lactuca sativa* II 0,26 und *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I 0,25 (Abb. 4.35).

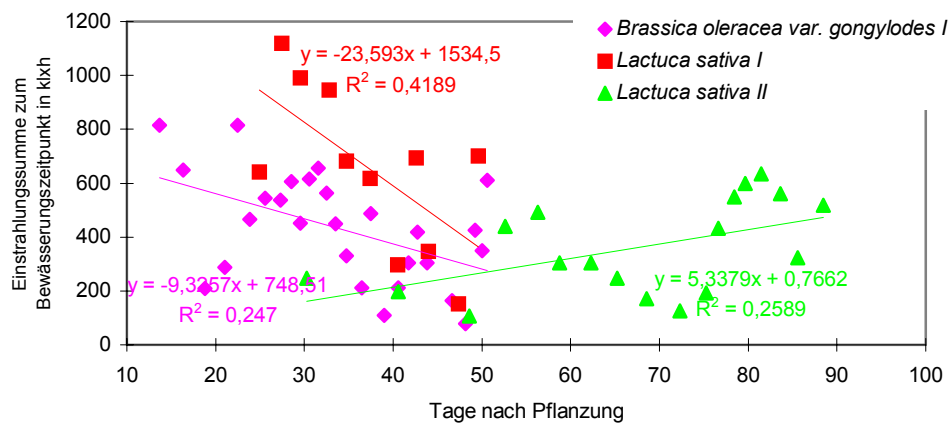


Abb. 4.35: Einstrahlungssummen zum Bewässerungszeitpunkt (IR_{Max}) in Abhängigkeit der Kulturtage (Tage n. Pflanzung) bei *Lactuca sativa* I, II und *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I.

Die Steuerung nach der Einstrahlungssumme ist eine in der gärtnerischen Praxis häufig eingesetzte Kontrollstrategie. Um die Zusammenhänge einer einstrahlungsabhängigen Bewässerungssteuerung darzustellen wurden Versuche mit *Ocimum basilicum* I bis III in 9 cm Töpfen und Ebbe-Flut-Bewässerung durchgeführt. Die Sollwerte der Einstrahlungssummen wurden je nach Jahreszeit, aufgrund von Ergebnissen der Vorjahre, zwischen 200 klxh und 1200 klxh gestaffelt. Zum Vergleich diente eine tensiometergesteuerte Variante mit einem Einschaltpunkt von 120 hPa. Zu Kulturrende wurde die Frischmasse erfasst (Tab-A 16). Da das Ertragsniveau der verschiedenen Sätze sehr unterschiedlich war wurde für die Darstellung der Ergebnisse der Ertrag in Prozent auf die tensiometergesteuerten Variante bezogen. Auffallend ist, dass bei allen Sätzen die tensiometergesteuerte Variante die höchsten Erträge brachten (Abb. 4.36).

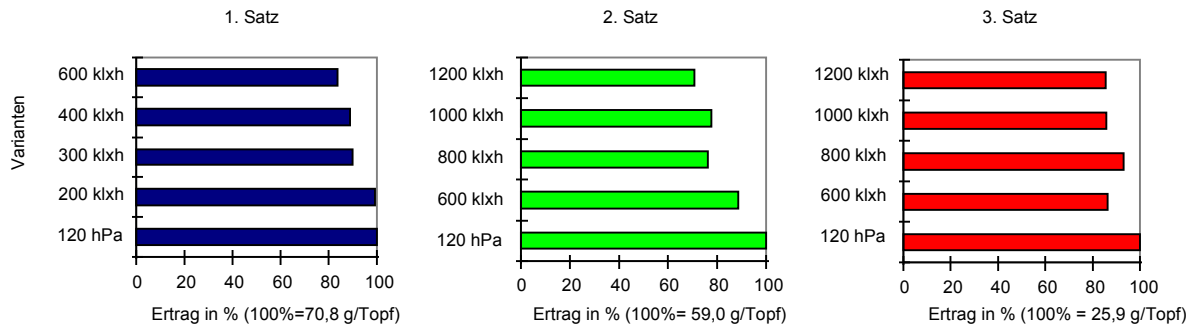


Abb. 4.36: Einfluss der Sollwerteinstellungen von einstrahlungs- und tensiometergesteuerten Varianten bei 3 Sätzen *Ocimum basilicum* mit Ebbe-Flut Bewässerung.

Die zum Gießzeitpunkt der tensiometergesteuerten Varianten aufsummierten Einstrahlungssummen des 1., 2., und 3. Satzes verringern sich im Verlauf der Kulturzeit (Abb. 4.37).

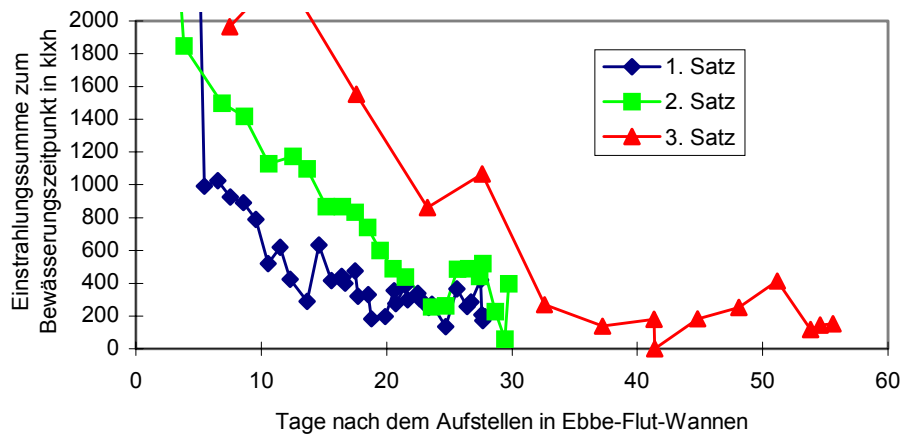


Abb. 4.37: Einstrahlungssummen zum Bewässerungszeitpunkt der tensiometergesteuerten (120 hPa Einschaltzeitpunkt) Variante von *Ocimum basilicum* mit Ebbe-Flut Bewässerung.

Vergleiche der Einstrahlungssummen (Abb. 4.38) des 3. Satzes zeigen, dass zu Kulturbeginn die Summen der einstrahlungsabhängigen Varianten unter denen der tensiometergesteuerten Varianten lagen. Dies führte zu häufigeren Bewässerungsvorgängen. Ab etwa dem 23. Tag nach dem Aufstellen war das Verhältnis umgekehrt. Damit die Pflanzen der einstrahlungsabhängigen Varianten nicht vertrockneten musste vor dem automatischen Einschalten ein Stauvorgang von Hand ausgelöst werden.

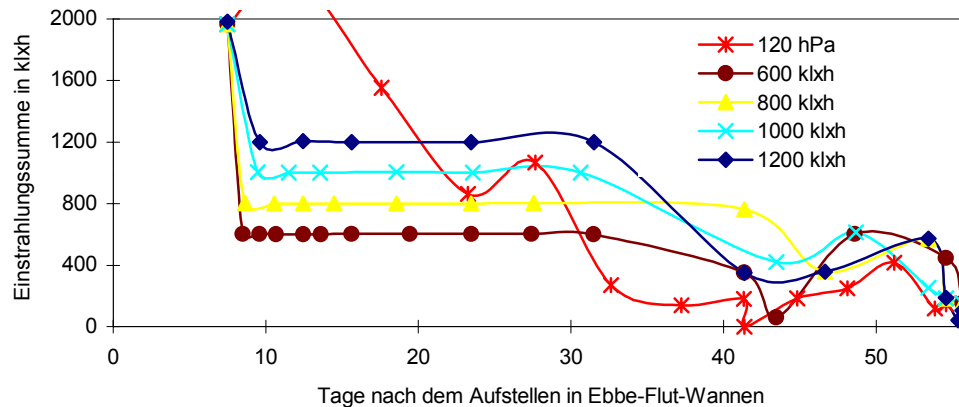


Abb. 4.38: Einstrahlungssummen zum Bewässerungszeitpunkt bei *Ocimum basilicum* III mit Ebbe-Flut Bewässerung.

Übersicht des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme der verschiedenen Gemüsearten

Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme der einzelnen Gießakte lag zwischen 0,64 bei *Cucumis sativus* I und 0,96 bei *Lactuca sativa* I und war höher als die der Zusammenfassung aller Gießakte, -0,15 bei *Cucumis sativus* I und 0,55 bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I. Die Steigung (a) der einzelnen Regressionsgeraden hatte einen Variationskoeffizienten von 31 % bis 98 % (Tab. 4.9).

Tab. 4.9: Statistische Parameter zur Beurteilung der Einstrahlungssumme als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung bei *Lactuca sativa*, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* und *Cucumis sativus*.

| | <i>Lactuca sativa</i> I | <i>Lactuca sativa</i> II | <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I | <i>Cucumis sativus</i> I |
|--|----------------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| Regressionsfunktion | $y=ax$ d.h. $vw=a_{IR} IR$ | | | |
| Wasserumsatz (y) in | ml/m ² | ml/m ² | ml/m ² | ml/Pflanze |
| Ausgewertete Gießakte | 11 | 18 | 29 | 9 |
| Parameter der Regressionsfunktionen der einzelnen Gießakte | | | | |
| R ² (Mittelwert) | 0,96 | 0,89 | 0,88 | 0,64 |
| Variationskoeffizient von $a_{(IR)}$ | 60,7 % | 30,8 % | 56,9 % | 97,6 % |
| Parameter der Regressionsfunktion aller Gießakte | | | | |
| Regressionsfunktion | $y= 2,27x$ | $y=3,12x$ | $y=3,50x$ | $y=1,67x$ |
| n | 1356 | 2343 | 2702 | 1217 |
| R ² | 0,39 | 0,34 | 0,55 | -0,15 |

4.3.3.2 SÄTTIGUNGSDEFIZITSUMME

Der Zusammenhang zwischen dem Wasserumsatz und der errechneten Sättigungsdefizitsumme wird bei *Lactuca sativa* I und II, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I und *Cucumis sativus* I dargestellt.

Dabei liegen die gleichen Messreihen, wie für den Matrixpotentialanstieg erfasst und bereits für die Einstrahlungssumme verwendet, zugrunde. Die Sättigungsdefizitsumme (IS) wurde aus dem Sättigungsdefizit (Δp_L), das aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte errechnet (Kap 3.4.1, Kap 4.2.4) wurde, gebildet. Eine ausführliche Darstellung der Zusammenhänge erfolgt am Beispiel von *Lactuca sativa* II wobei 18 Gießtakte ausgewertet wurden (Abb. 4.39).

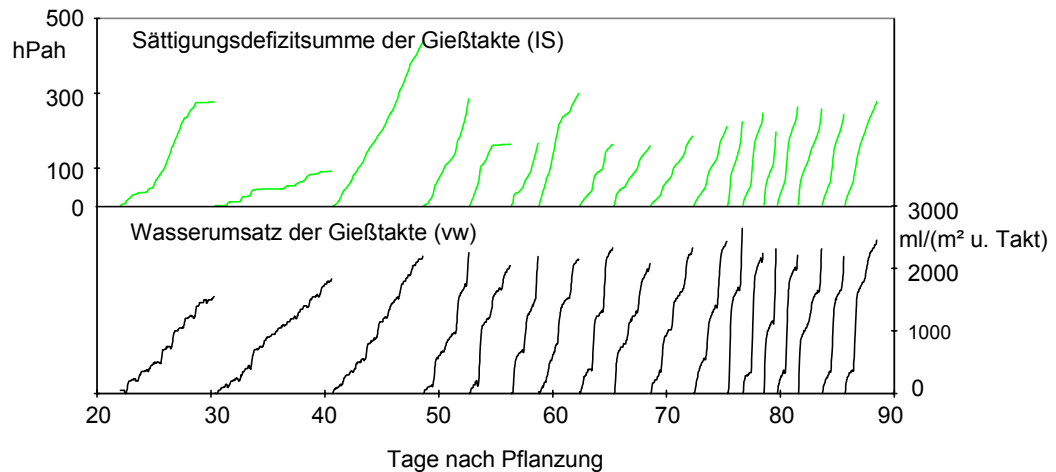


Abb. 4.39: Wasserumsatz und Sättigungsdefizitsumme der Gießtakte bei *Lactuca sativa* II.

Regressionsfunktionen einzelner Gießtakte

Das Bestimmtheitsmaß der einzelnen Gießtakte ist bei *Lactuca sativa* II größer 0,9. Das aller Gießtakte zusammengefasst 0,46. Der Variationskoeffizient der Steigung (a) der einzelnen Regressionsfunktionen ist 30 % (Tab. 4.10).

Tab. 4.10: Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Sättigungsdefizitsumme bei *Lactuca sativa* II.

| Gießtakt | n | a | R ² | Gießtakt | n | a | R ² |
|---|------------------------|-------|----------------|----------|------|-----------------------|----------------|
| Regressionsfunktion der einzelnen Gießtakte | | | | | | | |
| 1 | fehlerhafte Messreihen | | | 10 | 134 | 13,05 | 0,99 |
| 2 | 360 | 19,22 | 0,96 | 11 | 107 | 11,97 | 0,99 |
| 3 | 275 | 5,26 | 0,99 | 12 | 47 | 12,24 | 0,90 |
| 4 | 143 | 7,54 | 0,98 | 13 | 65 | 10,00 | 0,98 |
| 5 | 131 | 10,08 | 0,90 | 14 | 41 | 11,23 | 0,90 |
| 6 | 86 | 13,08 | 0,93 | 15 | 65 | 9,04 | 0,97 |
| 7 | 126 | 6,24 | 0,91 | 16 | 76 | 9,01 | 0,91 |
| 8 | 106 | 14,00 | 0,99 | 17 | 69 | 8,31 | 0,97 |
| 9 | 117 | 13,64 | 0,97 | 18 | 101 | 9,49 | 0,97 |
| | | | | | | Mittelwert | 10,79 |
| | | | | | | Standardabweichung | 3,26 |
| | | | | | | Variationskoeffizient | 30,22 |
| Regressionsfunktion aller Gießtakte | | | | | | | |
| 2-18 | | | | | 2342 | 7,65 | 0,46 |

Bei den einzelnen Regressionsfunktionen ist zu erkennen, dass die Sättigungsdefizitsumme nicht immer parallel zur Regressionslinie verläuft (Abb. 4.40).

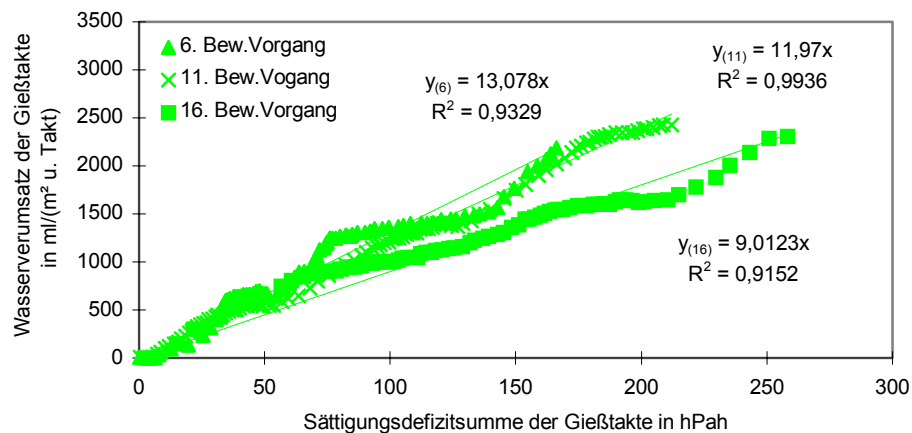


Abb. 4.40: Wasserumsatz ausgewählter Gießakte in Abhängigkeit der Sättigungsdefizitsumme bei *Lactuca sativa* II.

Wasserumsatz eines Gießtaktes

Die Sättigungsdefizitsumme spiegelt zwar den Wasserverbrauch der Nachtstunden wieder berücksichtigt allerdings die durch die Schließung der Stomata verringerte Transpiration nicht. Bei gleichem Sättigungsdefizit wird der Wasserverbrauch tagsüber und nachts gleich bewertet (Abb. 4.41). Dadurch kommt es bei der Sättigungsdefizitsumme zu einer Über- bzw. Unterschätzung des Wasserumsatzes.

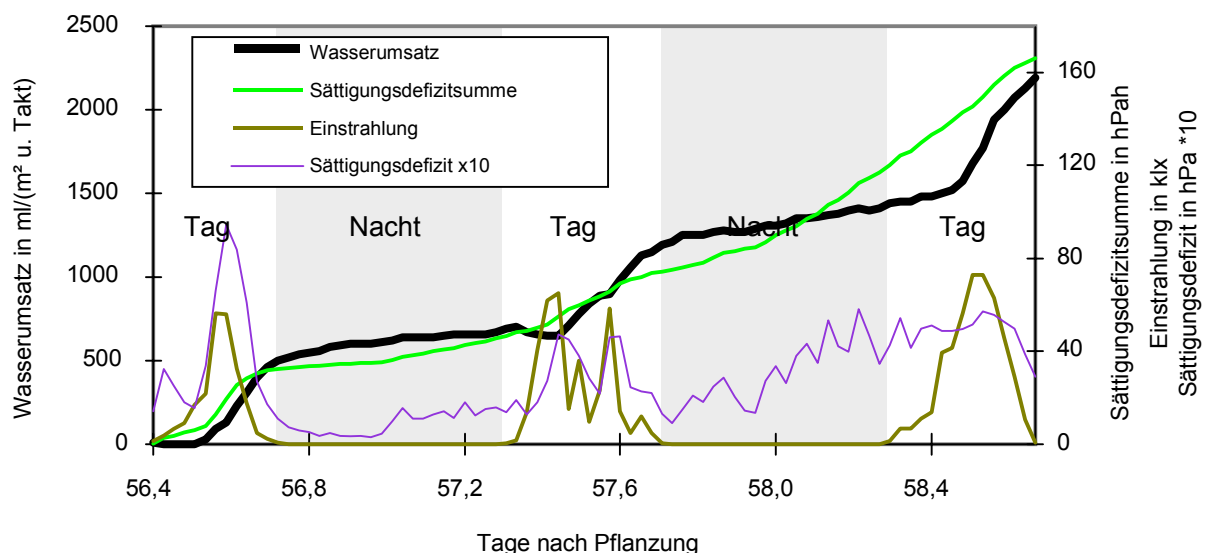
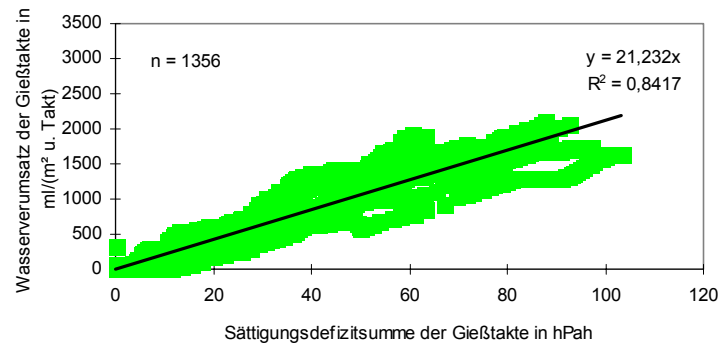


Abb. 4.41: Zeitlicher Verlauf des Wasserumsatzes, Sättigungsdefizit, Sättigungsdefizitsumme und Einstrahlung bei *Lactuca sativa* II (6. Gießtakt).

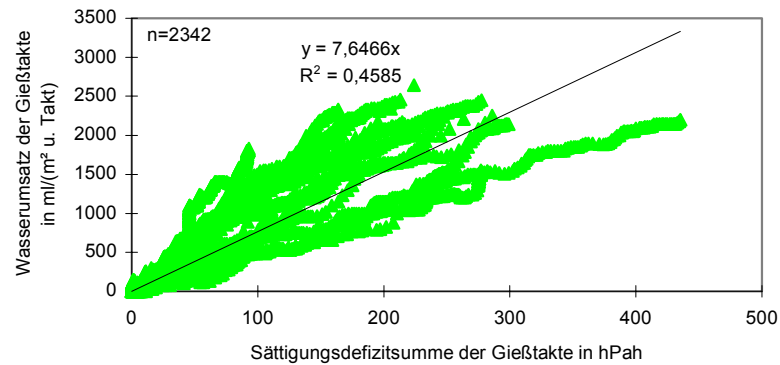
Regressionsfunktion aller Gießakte

Das Bestimmtheitsmaß aller Gießakte beträgt bei *Lactuca sativa* I 0,84, bei *Lactuca sativa* II 0,46, bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I 0,46 und bei *Cucumis sativus* I 0,61 (Abb. 4.42).

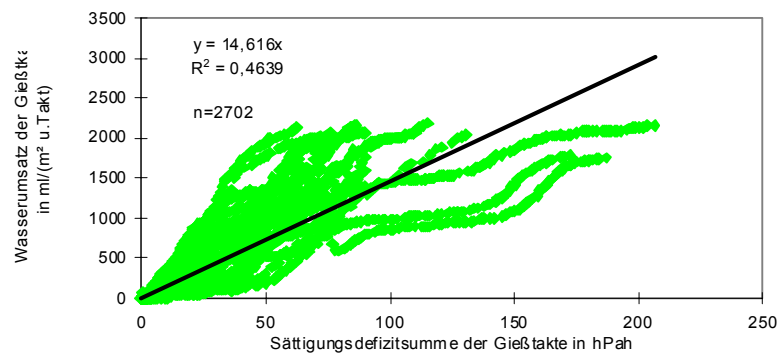
Lactuca sativa I



Lactuca sativa II



Brassica oleracea var. *gongylodes* I



Cucumis sativus I

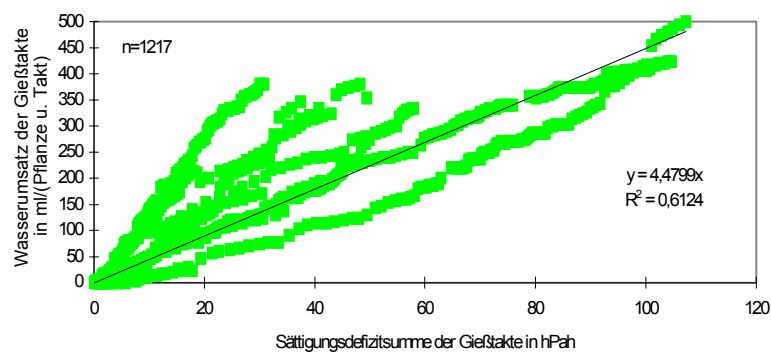


Abb. 4.42: Wasserumsatz aller Gießakte in Abhängigkeit der Sättigungsdefizitsumme bei verschiedenen Kulturen.

Sättigungsdefizitsumme in Abhängigkeit der Kulturdauer

In der Darstellung des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Sättigungsdefizitsumme aller Gießakte (Abb. 4.42) sind ebenfalls einzelne Gießakte deutlich zu erkennen und ein Zusammenhang mit der

Pflanzenentwicklung bzw. dem Kulturtag zu vermuten. Bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I ist das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion der zum Bewässerungszeitpunkt aufgelaufenen Sättigungsdefizitsumme in Abhängigkeit des Kulturtages 0,70, bei *Lactuca sativa* I 0,94 und bei *Lactuca sativa* II 0,00. Bei *Lactuca sativa* II fallen die ersten 7 Gießtakte aus dem Rahmen der Regressionsfunktion (Abb. 4.43).

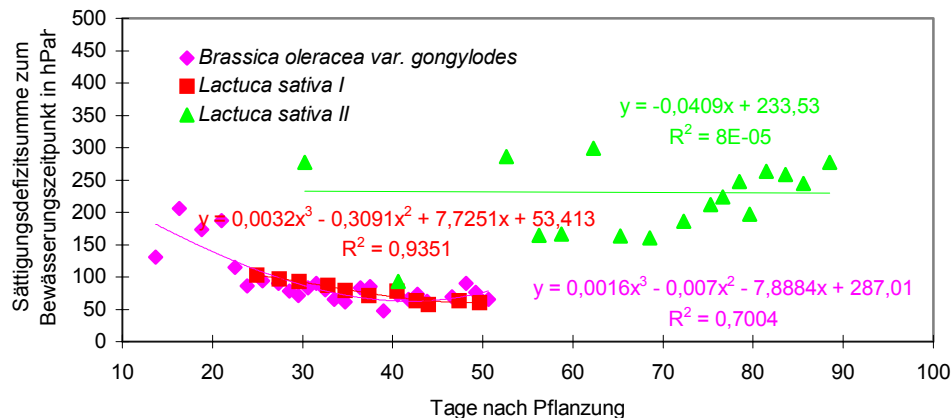


Abb. 4.43: Sättigungsdefizitsummen zum Bewässerungszeitpunkt (IS_{Max}) bei *Lactuca sativa* I und II und *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I.

Übersicht des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Sättigungsdefizitsumme der verschiedenen Gemüsearten

Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionsfunktionen der einzelnen Gießtakte lag bei den einzelnen Gemüsearten zwischen 0,88 (*Brassica oleracea* var. *gongylodes* I) und 0,98 (*Lactuca sativa* I). Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion aller Gießtakte zwischen 0,46 (*Brassica oleracea* var. *gongylodes*) und 0,84 (*Lactuca sativa* I). Die Variationskoeffizienten der Steigung (a) der Regressionsgeraden ($y=ax$) lagen zwischen 18 % und 42 % (Tab. 4.11).

Tab. 4.11: Statistische Parameter zur Beurteilung der Sättigungsdefizitsumme als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung bei *Lactuca sativa*, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* und *Cucumis sativus*.

| | <i>Lactuca sativa</i> I | <i>Lactuca sativa</i> II | <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I | <i>Cucumis sativus</i> I |
|---|----------------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| Regressionsfunktion | $y=ax$ d.h. $vw=a_{IS} IS$ | | | |
| Wasserumsatz (y) in | ml/m ² | ml/m ² | ml/m ² | ml/Pflanze |
| Ausgewertete Gießtakte | 11 | 18 | 29 | 9 |
| Parameter der Regressionsfunktionen der einzelnen Gießtakte | | | | |
| R^2 (Mittelwert) | 0,98 | 0,95 | 0,88 | 0,95 |
| Variationskoeffizient von $a_{(IS)}$ | 18,32 | 30,22 | 30,68 | 41,60 |
| Parameter der Regressionsfunktion aller Gießtakte | | | | |
| Regressionsfunktion | $y=21,2x$ | $y=7,6x$ | $y= 16,6x$ | $y=4,7x$ |
| n | 1356 | 2343 | 2702 | 1217 |
| R^2 | 0,84 | 0,46 | 0,46 | 0,61 |

4.3.3.3 DAMPFDRUCKDIFFERENZSUMME

Die Abhängigkeit des Wasserumsatzes von der Dampfdruckdifferenzsumme wurde bei *Lactuca sativa* II und *Cucumis sativus* I, da nur hier entsprechende Blatttemperaturmessungen durchgeführt werden konnten, berechnet. Die Regressionsfunktionen wurden aus den Messwerten, die auch in den Versuchen zum Matrixpotentialanstieg verwendet wurden, berechnet. Die Dampfdruckdifferenz (Δp_{BL}) wurde aus der Blatttemperatur, der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte berechnet (Kap. 3.4.1). Die ausführliche Darstellung erfolgt bei *Lactuca sativa* II und einer Auswertung von 18 Gießtakte (Abb. 4.44).

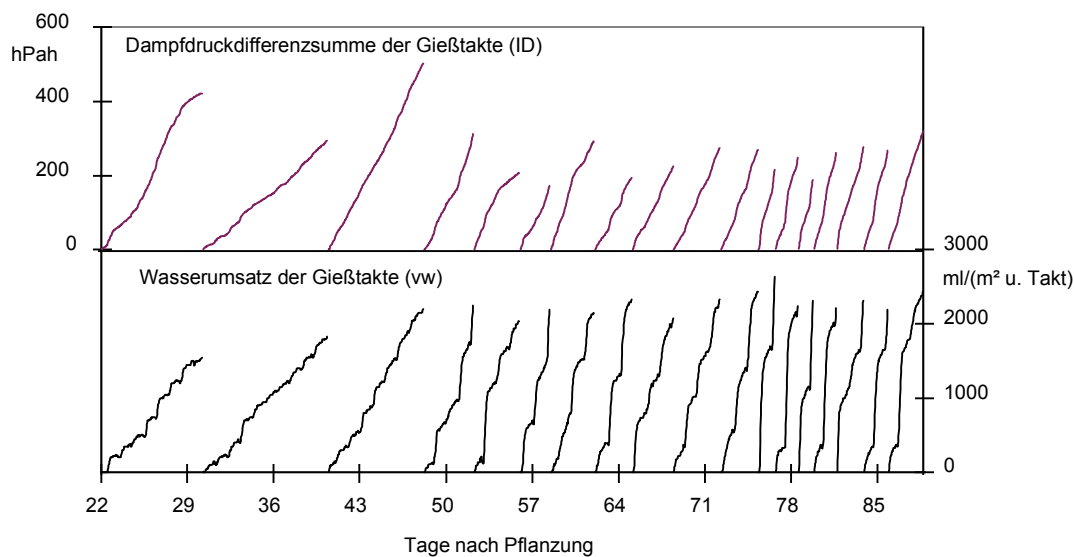


Abb. 4.44: Wasserumsatz und Dampfdruckdifferenzsumme der Gießtakte bei *Lactuca sativa* II.

Wasserumsatz einzelner Gießtakte

Die Regressionsfunktionen der einzelnen Gießtakte hatten bei *Lactuca sativa* II ein Bestimmtheitsmaß zwischen 0,83 und 0,99. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion aller Gießtakte war 0,52. Wie bei der Sättigungsdefizitsumme (Abb. 4.40) ist auch bei der Dampfdruckdifferenzsumme ein leichtes Schwingen um die Regressionsgerade festzustellen (Abb. 4.45).

Tab. 4.12: Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenzsumme bei *Lactuca sativa* II.

| Gießtakt | n | a | R ² | Gießtakt | n | a | R ² |
|---|------------------------|-------|----------------|----------|------|-------|----------------|
| Regressionsfunktion der einzelnen Gießstakte | | | | | | | |
| 1 | fehlerhafte Messreihen | | | 10 | 134 | 8,79 | 0,99 |
| 2 | 360 | 6,44 | 0,99 | 11 | 107 | 9,10 | 0,99 |
| 3 | 275 | 4,52 | 0,99 | 12 | 47 | 12,50 | 0,86 |
| 4 | 143 | 6,42 | 0,98 | 13 | 65 | 9,92 | 0,96 |
| 5 | 131 | 9,28 | 0,96 | 14 | 41 | 11,22 | 0,84 |
| 6 | 86 | 11,91 | 0,96 | 15 | 65 | 8,95 | 0,95 |
| 7 | 126 | 6,68 | 0,94 | 16 | 76 | 8,29 | 0,83 |
| 8 | 106 | 11,91 | 0,98 | 17 | 69 | 7,65 | 0,96 |
| 9 | 117 | 10,04 | 0,93 | 18 | 101 | 8,48 | 0,95 |
| Mittelwert Standardabweichung Variationskoeffizient | | | | | | 8,95 | 0,94 |
| | | | | | | 2,13 | |
| | | | | | | 23,8 | |
| Regressionsfunktion aller Gießstakte | | | | | | | |
| Gießstakte 2-18 | | | | | 2342 | 6,10 | 0,52 |

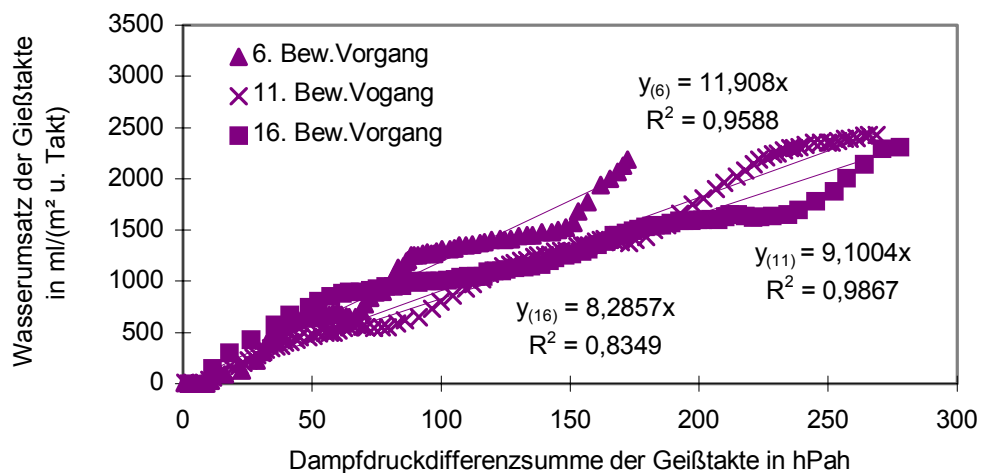
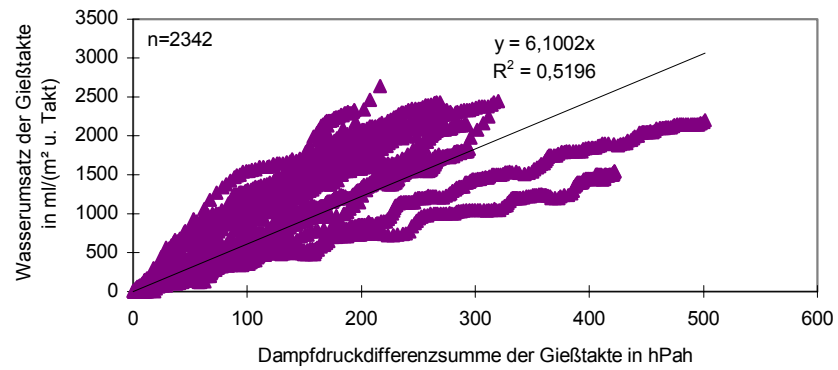


Abb. 4.45: Wasserumsatz ausgewählter Gießstakte in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenzsumme bei *Lactuca sativa* II.

Regressionsfunktion aller Gießakte

Das Bestimmtheitsmaß aller Gießakte des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenzsumme ist bei *Lactuca sativa* II 0,52 und bei *Cucumis sativus* I 0,60 (Abb. 4.46).

Lactuca sativa II



Cucumis sativus I

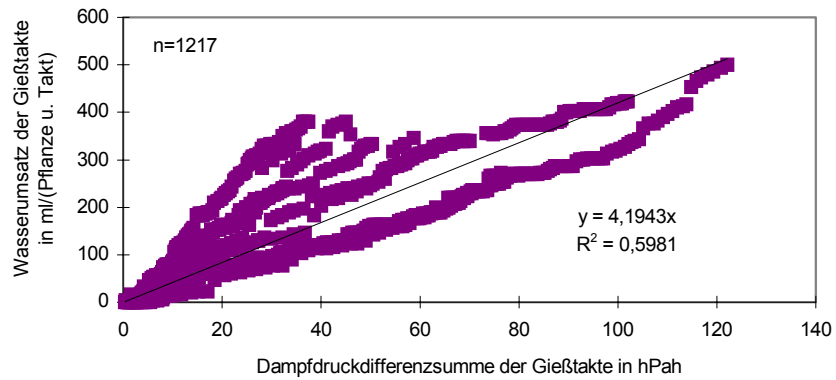


Abb. 4.46: Wasserumsatz aller Gießakte in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenzsumme bei verschiedenen Kulturen.

Dampfdruckdifferenzsumme in Abhängigkeit der Kulturdauer

Das Bestimmtheitsmaß der Dampfdruckdifferenzsumme in Abhängigkeit der Kulturdauer beträgt bei *Lactuca sativa* II 0,21 und bei *Cucumis sativus* I 0,02 (Abb. 4.47).

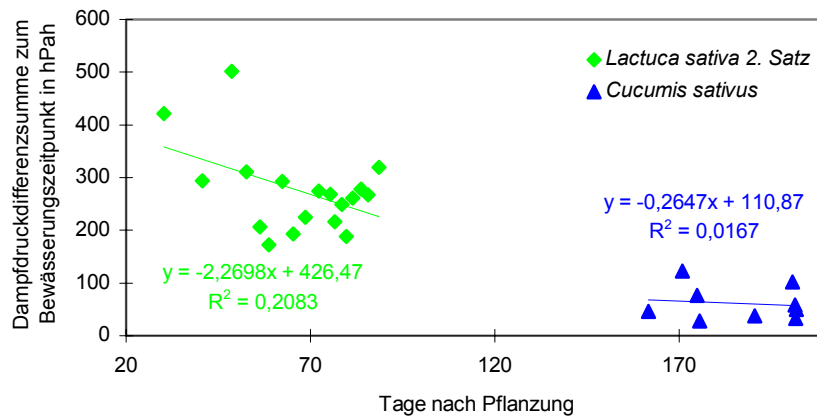


Abb. 4.47: Dampfdruckdifferenzsummen (ID_{Max}) zum Bewässerungszeitpunkt bei *Lactuca sativa* II und *Cucumis sativus* I.

Übersicht des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenzsumme der verschiedenen Gemüsearten

Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenzsumme aller Gießtakte beträgt bei *Lactuca sativa* II 0,52 und bei *Cucumis sativus* I 0,60. Der Variationskoeffizient der Steigung (a) der Regressionsfunktionen der Gießtakte ist bei *Lactuca sativa* II 24% und bei *Cucumis sativus* I 3% (Tab. 4.13).

Tab. 4.13: Statistische Parameter zur Beurteilung der Dampfdruckdifferenzsumme als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung bei *Lactuca sativa* und *Cucumis sativus*.

| | <i>Lactuca sativa</i> II | <i>Cucumis sativus</i> I |
|---|----------------------------|--------------------------|
| Regressionsfunktion | $y=ax$ d.h. $vw=a_{ID} ID$ | |
| Wasserumsatz der Gießtakte (m_w) | ml/m ² | ml/Pflanze |
| Ausgewertete Gießtakte | 18 | 9 |
| Parameter der Regressionsfunktionen der einzelnen Gießtakte | | |
| R^2 (Mittelwert) | 0,94 | 0,96 |
| Variationskoeffizient von $a_{(ID)}$ | 23,8 | 2,5 |
| Parameter Regressionsfunktion aller Gießtakte | | |
| Regressionsfunktion | $y=6,1x$ | $y=4,2x$ |
| n | 2342 | 1217 |
| R^2 | 0,52 | 0,60 |

4.3.4 WASSERUMSATZ IN ABHÄNGIGKEIT DER KOMBINATION MEHRERER EINZELGRÖßEN

Bei der Auswertung der Regressionsfunktionen der einzelnen Einflussfaktoren (Einstrahlung, Sättigungsdefizit und Dampfdruckdifferenz) ist festzustellen, dass das Bestimmtheitsmaß der einzelnen Gießakte wesentlich höher ist als die aller Gießakte zusammengefasst. Im einzelnen muss festgestellt werden, dass die Einstrahlungssumme den Wasserumsatz der Nachtstunden nicht berücksichtigt. Die Sättigungsdefizitsumme und die Dampfdruckdifferenzsumme werten die tagsüber und nachts vorherrschenden Sättigungsdefizite bzw. Dampfdruckdifferenzen gleich, was zu einer Über- bzw. Unterschätzung des Wasserverbrauchs führt.

Da die Höhe der Transpiration sowohl von dem physikalisch begründeten Therm, dem Sättigungsdefizit bzw. der Dampfdruckdifferenz als auch von dem stomatären Leitwert, der von der Einstrahlung beeinflusst wird, abhängig ist, liegt eine Kombination mehrerer Größen nahe.

4.3.4.1 EINSTRAHLUNGS- UND SÄTTIGUNGSDEFIZITSUMME

Für die bereits bei den Einzelgrößen beschriebenen Gemüsearten wurde eine Regressionsfunktion des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Kombination der Einstrahlungssumme und der Sättigungsdefizitsumme durchgeführt (Tab. 4.14). Der Regressionsanalyse wurde dabei folgende Funktion zugrundegelegt:

$$vw = a_{ir} \cdot IR + a_{is} \cdot IS \quad F (4.6)$$

Tab. 4.14: Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit von Einstrahlungs- und Sättigungsdefizitsumme bei *Lactuca sativa*, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* und *Cucumis sativus*.

| | <i>Lactuca sativa</i> I | <i>Lactuca sativa</i> II | <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I | <i>Cucumis sativus</i> I |
|---|-------------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| Wasserumsatz der Gießakte (vw) in | ml/m ² | ml/m ² | ml/m ² | ml/Pflanze |
| Ausgewertete Gießakte | 11 | 18 | 29 | 9 |
| Koeffizienten Einstrahlungssumme (a _{IR}) | 0,13 | 2,38 | 2,06 | 0,53 |
| Sättigungsdefizitsumme (a _{IS}) | 20,22 | 3,83 | 7,28 | 3,58 |
| Anzahl Beobachtungen (n) | 1297 | 2049 | 2599 | 760 |
| Multipler Korrelationskoeffizient | 0,92 | 0,91 | 0,86 | 0,84 |
| Bestimmtheitsmaß | 0,84 | 0,82 | 0,75 | 0,71 |

Durch eine Kombination der Einstrahlungssumme und der Sättigungsdefizitsumme konnten bei allen Arten ein höheres Bestimmtheitsmaß (0,71 bis 0,84) als bei den Regressionsanalysen der einzelnen Faktoren erzielt werden.

4.3.4.2 EINSTRAHLUNGS- UND DAMPFDRUCKDIFFERENZSUMME

Den Regressionsfunktionen (Tab. 4.14) des Wasserumsatzes (vw) in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme (IR) und der Dampfdruckdifferenzsumme (ID) liegt folgende Funktion zugrunde:

$$vw = a_{ir} \cdot IR + a_{ID} \cdot ID \quad F (4.7)$$

Tab. 4.15: Regressionsfunktionen des Wasserumsatz in Abhängigkeit der Einstrahlungs- und Dampfdruckdifferenzsumme bei *Lactuca sativa* und *Cucumis sativus*.

| | <i>Lactuca sativa</i> II | <i>Cucumis sativus</i> I |
|---|--------------------------|--------------------------|
| Wasserumsatz der Gießakte (vw) in | ml/m ² | ml/Pflanze |
| Ausgewertete Gießakte | 18 | 9 |
| Koeffizienten Einstrahlungssumme (a _{IR}) | 2,04 | 0,64 |
| Dampfdruckdifferenzsumme (a _{ID}) | 3,76 | 3,23 |
| Beobachtungen (n) | 2049 | 790 |
| Multipler Korrelationskoeffizient | 0,93 | 0,88 |
| Bestimmtheitsmaß | 0,86 | 0,77 |

Auch bei der Kombination der Dampfdruckdifferenz- und der Einstrahlungssumme ist das Bestimmtheitsmaß höher als bei den Regressionsanalysen der einzelnen Parameter.

4.3.4.3 EINSTRAHLUNGS-, SÄTTIGUNGSDEFIZITSUMME UND PFLANZENWACHSTUM

Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme und Kulturtag

Die Regressionsfunktion des Wasserumsatzes (vw) in Abhängigkeit der Kombination der Einstrahlungssumme (IR), der Sättigungsdefizitsumme (IS) und der Tage nach Pflanzung (Kulturtag) (KT) wurde nach folgender Funktion berechnet:

$$vw = a_{ir} \cdot IR + a_{IS} \cdot IS + a_{KT} \cdot KT \quad F (4.8)$$

Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion ist bei *Lactuca sativa* I 0,87, bei *Lactuca sativa* II 0,89, bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* 0,84 und bei *Cucumis sativus* I 0,77 (Tab. 4.16).

Tab. 4.16: Regressionsfunktion des Wasserumsatz in Abhängigkeit der Einstrahlungs-, der Sättigungsdefizitsumme und dem Kulturtag bei *Lactuca sativa*, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* und *Cucumis sativus*.

| | <i>Lactuca sativa</i> I | <i>Lactuca sativa</i> II | <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I | <i>Cucumis sativus</i> I |
|---|-------------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| Wasserumsatz der Gießakte (vw) in | ml/m ² | ml/m ² | ml/m ² | ml/Pflanze |
| Ausgewertete Gießakte | 11 | 18 | 29 | 9 |
| Koeffizienten Einstrahlungssumme (a_{IR}) | 0,25 | 2,10 | 1,86 | 0,41 |
| Sättigungsdefizitsumme (a_{IS}) | 16,44 | 3,30 | 5,56 | 2,97 |
| Kulturtag (a_{KT}) | 4,6 | 3,12 | 7,37 | 0,26 |
| Anzahl Beobachtungen n | 1297 | 2049 | 2599 | 760 |
| Multipler Korrelationskoeffizient | 0,94 | 0,92 | 0,92 | 0,88 |
| Bestimmtheitsmaß | 0,87 | 0,89 | 0,84 | 0,77 |

Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme und Blattfläche

Um den Wasserumsatz auf die Transpirationsfläche (Blattfläche) zu beziehen wurden die in Kapitel 4.3.2.1 ermittelten Regressionsfunktionen der Blattfläche in Abhängigkeit des Kulturtages und der Gesamtkulturdauer verwendet. Der Regressionsfunktion des Wasserumsatzes (vw) in Abhängigkeit der Kombination der Einstrahlungssumme (IR), der Sättigungsdefizitsumme (IS) und der Blattfläche (A_{bl}) beziehen sich auf folgende Funktion:

$$vw = a_{IR} \cdot IR + a_{IS} \cdot IS + a_{bl} \cdot A_{bl} \quad F (4.9)$$

Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion ist bei *Lactuca sativa* I 0,89, bei *Lactuca sativa* II 0,84 und bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* 0,84 (Tab. 4.17).

Tab. 4.17: Regressionsfunktion des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme der Sättigungsdefizitsumme und der Blattfläche bei *Lactuca sativa* und *Brassica oleracea* var. *gongylodes*.

| | <i>Lactuca sativa</i> I | <i>Lactuca sativa</i> II | <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I |
|---|-------------------------|--------------------------|---|
| Wasserumsatz der Gießakte (vw) in | ml/m ² | ml/m ² | ml/m ² |
| Ausgewertete Gießakte | 11 | 18 | 29 |
| Koeffizienten Einstrahlungssumme (a_{IR}) | 0,32 | 2,18 | 1,86 |
| Sättigungsdefizitsumme (a_{IS}) | 15,92 | 3,50 | 5,49 |
| Blattfläche (a_{bl}) | 0,07 | 0,03 | 0,21 |
| Anzahl Beobachtungen n | 1297 | 2049 | 2599 |
| Multipler Korrelationskoeffizient | 0,94 | 0,92 | 0,91 |
| Bestimmtheitsmaß | 0,89 | 0,84 | 0,84 |

Die Integration des Pflanzenwachstums in eine klimatische Modellgleichung zur Berechnung des Wasserumsatzes erbringt weitere, geringfügige Verbesserungen des Bestimmtheitsmaßes. Durch die Einbeziehung des Kulturtages erhöht sich das Bestimmtheitsmaß um 0,03 bis 0,09 gegenüber der Regressionsfunktion des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme und der Sättigungsdefizitsumme (Tab. 4.14). Durch die Blattfläche, die als Funktion des Kulturtages berechnet wurde konnten gegenüber einer reinen klimatischen Modellgleichung (Einstrahlungssumme und der Sättigungsdefizitsumme (Tab. 4.14)) um 0,05 bis 0,09 höheres Bestimmtheitsmaß erzielt werden (Tab. 4.17).

4.3.5 ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DER EINZELERGEBNISSE

Um die einzelnen Parameter und die Kombinationen mehrerer Parameter insgesamt beurteilen zu können, wurde aus dem Bestimmtheitsmaß aller Gießakte der verschiedenen Gemüsearten ein Mittelwert berechnet (Abb. 4.48). Bei dem Matrixpotential wurde ein Bestimmtheitsmaß von 0,84 bis 0,93, bei der Einstrahlungssumme -0,15 bis 0,55 und bei der Sättigungsdefizitsumme 0,46 bis 0,84 (Abb. 4.48) errechnet. Das Bestimmtheitsmaß der Kombination Einstrahlungssumme und Sättigungsdefizitsumme lag zwischen 0,77 und 0,89. Die Kombination Einstrahlungssumme und Dampfdruckdifferenzsumme hatte ein Bestimmtheitsmaß von 0,77 bis 0,86. Durch die Integration der Pflanze in Form des Kulturtages bzw. der Blattfläche konnte das Bestimmtheitsmaß im Vergleich zur Kombination Einstrahlungssumme und Sättigungsdefizitsumme um 0,03 bis 0,09 verbessert werden.

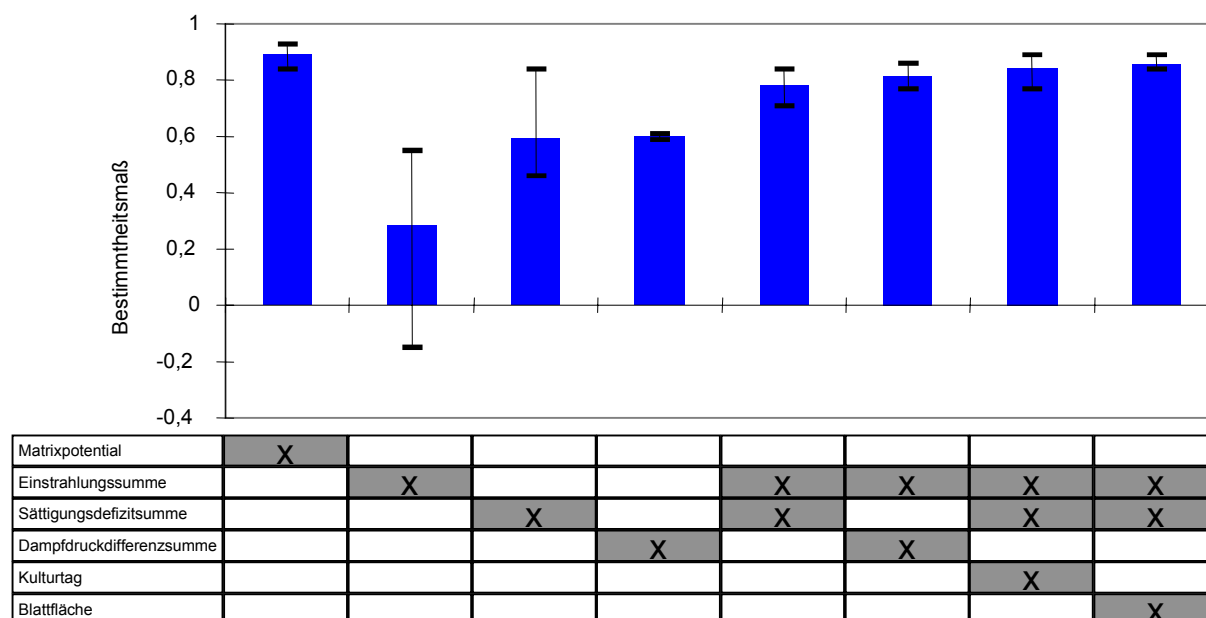


Abb. 4.48: Bestimmtheitsmaß des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter (Mittelwert aller Gießakte und Gemüsearten).

Die Steigung (a) der Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter und Kombinationen mehrerer Parameter sind für die einzelnen Kulturen sehr unterschiedlich. So ist z.B. bei der Einstrahlungssumme die Steigung a_{IR} bei *Lactuca sativa* I 2,27, bei *Lactuca sativa* II 3,12, bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I 3,5. Bei der Sättigungsdefizitsumme ist die Steigung a_{IS} bei *Lactuca sativa* I 21,20, bei *Lactuca sativa* II 7,60, bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I 16,62. (Tab. 4.18). Die unterschiedlichen Steigungen des Matrixpotentials sind bei *Lactuca sativa* I und *Lactuca sativa* II durch die verschieden hoch gewählten Einschaltpunkte der Bewässerung (70 und 40 hPa) zu erklären.

Tab. 4.18: Steigung (a_x) und Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionsfunktionen ($y=ax$) des Wasserumsatzes aller Gießakte in l/m² bzw. ml/Pflanze in Abhängigkeit des Matrixpotentials, der klimatischen Faktoren und dem Pflanzenwachstum.

| Matrixpotential a_{IM} | Einstrahlungssumme a_{IR} | Sättigungsdefizitsumme a_{IS} | Dampfdruckdifferenzsumme a_{ID} | Kulturtag a_{KT} | Blattfläche $a_{A(BI)}$ | Bestimmtheitsmaß R^2 |
|--|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|
| <i>Lactuca sativa</i> I (Wasserumsatz in ml/m ²) | | | | | | |
| 33,04 | | | | | | 0,84 |
| | 2,27 | | | | | 0,39 |
| | | 21,20 | | | | 0,84 |
| | 0,13 | 20,22 | | | | 0,84 |
| | 0,25 | 16,44 | | 4,60 | | 0,87 |
| | 0,32 | 15,92 | | | 0,07 | 0,89 |
| <i>Lactuca sativa</i> II (Wasserumsatz in ml/m ²) | | | | | | |
| 70,86 | | | | | | 0,93 |
| | 3,12 | | | | | 0,34 |
| | | 7,60 | | | | 0,46 |
| | | | 6,10 | | | 0,52 |
| | 2,38 | 3,83 | | | | 0,82 |
| | 2,04 | | 3,76 | | | 0,86 |
| | 2,10 | 3,30 | | 3,12 | | 0,89 |
| | 2,18 | 3,50 | | | 0,03 | 0,84 |
| <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> (Wasserumsatz in ml/m ²) | | | | | | |
| 34,38 | | | | | | 0,90 |
| | 3,50 | | | | | 0,55 |
| | | 16,62 | | | | 0,46 |
| | 2,06 | 7,28 | | | | 0,75 |
| | 1,86 | 5,56 | | 7,37 | | 0,84 |
| | 1,86 | 2,49 | | | 0,21 | 0,84 |
| <i>Cucumis sativus</i> (Wasserumsatz in ml/Pflanze) | | | | | | |
| 10,65 | | | | | | 0,90 |
| | 1,67 | | | | | -0,15 |
| | | 4,70 | | | | 0,61 |
| | | | 4,20 | | | 0,60 |
| | 0,53 | 3,58 | | | | 0,71 |
| | 0,64 | | 3,23 | | | 0,77 |
| | 0,41 | 2,97 | | 0,26 | | 0,77 |

Als Maß für die Streuung der verschiedenen Parameter innerhalb einer Pflanzenart wurde der Variationskoeffizient der Steigung (a_x) der einzelnen Regressionsgeraden berechnet. Bei dem Matrixpotential liegt der Variationskoeffizient zwischen 1,6 % und 13,3 %, der Mittelwert beträgt 9,7 %. Bei der Einstrahlungssumme ist die Schwankungsbreite zwischen 60,7 % und 97,6 %. Der Mittelwert beträgt 61,5 %. Bei der Sättigungsdefizitsumme 18,3 % bis 41,6 %, der Mittelwert 30,2 % (Tab. 4.19).

Tab. 4.19: Variationskoeffizienten der Steigung a der Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes der einzelnen Gießakte bei verschiedenen Kulturen und Einflussfaktoren.

| Einflussfaktor | <i>Lactuca sativa</i> I | <i>Lactuca sativa</i> II | <i>Brassica oleracea gongylodes</i> I | <i>Cucumis sativus</i> I | Mittelwert (aller Gemüsearten) |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Matrixpotential (IM) | 13,3 | 10,2 | 13,8 | 1,6 | 9,7 |
| Einstrahlungssumme (IR) | 60,7 | 30,8 | 56,9 | 97,6 | 61,5 |
| Sättigungsdefizitsumme (IS) | 18,3 | 30,2 | 30,7 | 41,6 | 30,2 |
| Dampfdruckdifferenzsumme (ID) | -- | 23,8 | -- | 2,47 | 13,1 |

-- nicht erfasst

5 DISKUSSION

Um zu prüfen, welche Parameter zur Steuerung der Bewässerung von Gewächshauskulturen geeignet sind und wie dazu die notwendigen Kontrollstrategien aufzubauen sind, wurden umfassende Versuche durchgeführt. Neben den bodenspezifischen, pflanzlichen und klimatischen Parametern wurden Kombinationen aus pflanzlichen und klimatischen Parametern berücksichtigt. Zur Beschreibung des Wasserumsatzes in Abhängigkeit verschiedener Parameter wurden jeweils die zwischen 2 Bewässerungsvorgängen vorherrschenden Bedingungen mit dem Wasserumsatz, der über eine elektronische Waage gemessen wurde (Kap. 4.2.3.4), in Beziehung gesetzt. Dieser Zeitraum wird als Gießtakt bezeichnet (Kap. 4.2.4).

5.1 EIGNUNG VERSCHIEDENER PARAMETER ZUR STEUERUNG DER BEWÄSSERUNG

5.1.1 BODENSPEZIFISCHE PARAMETER

Neben der Eignung des Matrixpotentials als Führungsgröße zur Steuerung der Bewässerung ist bei einem Anbau im gewachsenem Boden die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens zu berücksichtigen. Vor allem bei dem Einsatz von Tropfbewässerungssystemen kann es aufgrund hoher Gießwassermengen zur Wasserversickerung kommen.

Wasserspeicherfähigkeit des Bodens bei Tropfbewässerungssystemen

Wie die Untersuchungen zeigen, ist bei einer Tropfbewässerung je nach der Bewässerungsmenge pro Tropfstelle und Bewässerungsvorgang mit Sickerwasser zu rechnen. So konnte nachgewiesen werden, dass bereits bei einer Gießwassermenge von 600 ml pro Tropfstelle und Gabe und einem Einschaltpunkt von 90 hPa bei einem sandigen Lehm Boden regelmäßig Sickerwasser auftritt (Abb. 4.12). Bei einer Bewässerung mit 500 ml ist hingegen kein Sickerwasser aufgetreten.

Um die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens in Abhängigkeit des Matrixpotentials näher zu untersuchen, wurden von einem sandigen Lehm Boden pF-Kurven in verschiedenen Bodentiefen ermittelt. Diese zeigen sehr unterschiedliche Verläufe (Abb. 4.13). Eine aus den Bodenschichten von 0 bis 10, 10 bis 20 und 20 bis 30 cm errechnete Durchschnittskurve (Abb. 4.14) ergibt bei einem Matrixpotential von 60 hPa eine Wasserspeicherfähigkeit von 45 ml pro l Bodenvolumen. Bei 150 hPa beträgt die Wasserspeicherfähigkeit 87 ml/l Bodenvolumen und ist somit annähernd verdoppelt. So kann aufgrund der höheren Wasserspeicherfähigkeit bei einem höheren Einschaltpunkt die Bewässerungszeit verlängert und damit die Wasserverteilgenauigkeit verbessert werden.

Die durch das Befüllen und das Auslaufen der Tropfsysteme nach dem Gießvorgang auftretenden Ungleichmäßigkeiten (HÖFERT et al. 1994) werden dadurch minimiert.

In der Darstellung von BIERHUIZEN (Abb. 3.11) sind bei höheren Matrixpotentialen Ertragseinbußen zu erwarten (BIERHUIZEN und VOS 1959). Da es sich bei den vorliegenden experimentellen Untersuchungen zum Matrixpotential um den Einschaltpunkt der Bewässerung handelt und dies nicht ein Anbau bei einem konstanten Matrixpotential ist, muss der von KELL beschriebene Einfluss des Einschaltpunktes auf das mittlere Matrixpotential berücksichtigt werden (Abb. 3.12) (KELL et al. 1997).

In den eigenen Untersuchungen an *Zantedeschia aethiopica* I (Abb. 4.16, Abb. 4.17) wurde durch einen Matrixpotentialanstieg auf 350 hPa keine Verminderung der Transpiration festgestellt.

Bei *Cucumis sativus* II hatte eine Erhöhung des Einschaltpunktes von 60 auf 150 hPa und bei *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* II und *Capsicum annuum* I von 90 auf 150 bei Verdoppelung der Wassermenge pro Gießtakt keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag (Tab. 4.2). Bei den insgesamt ausgebrachten Wassermengen ergaben sich zwischen der niedrigen und der hohen Einschaltspannung keine Unterschiede.

Die Zusammenhänge zwischen dem Matrixpotential und der Transpiration sowie dem Matrixpotential und dem Ertrag zeigen, dass die untersuchten Pflanzen bei einer automatischen Bewässerung mit einem Einschaltpunkt zwischen 60 hPa und 150 hPa bzw. bei der Untersuchung zur Transpiration bis 350 hPa tolerant reagieren und somit eine Erhöhung des Einschaltpunktes durchaus vertretbar und aufgrund der besseren Wasserverteilgenauigkeit auch sinnvoll ist. Die von FRENZ vorgegebenen Optimalbereiche zur Steuerung der Bewässerung können durchaus auf 150 hPa erweitert werden (FRENZ 1979).

Die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens ist allerdings nicht allein für eine mögliche Wasserversickerung bei einer Tropfbewässerung ausschlaggebend. Bei dem Einsatz von Tropfbewässerungssystemen muss zusätzlich die durch die Tropfstelle befeuchtete Bodenvolumen berücksichtigt werden.

Zur Beschreibung der Wasserverteilung in und um eine Tropfstelle wurde vor und nach einem Bewässerungsvorgang der Wassergehalt in verschiedenen Abständen zur Tropfstelle (Abb. 4.4) bestimmt. Dabei wurde festgestellt, dass die Wassergehalte je nach Abstand zur Tropfstelle sehr unterschiedlich sind. Die ausgebrachte Wassermenge (300 ml pro Tropfstelle und Gabe) verteilte sich in einem Radius von ca. 15 bis 20 cm um die Tropfstelle. Ab einer Messtiefe von 20 cm konnte keine Veränderung im Feuchtegehalt durch einen Gießvorgang festgestellt werden.

Es wird angenommen, dass bei einem sandigen Lehm Boden und einer Wassermenge von 300 ml/Tropfstelle und Gabe ein Bodenvolumen von ca. 8-20 l je Tropfstelle befeuchtet wird. Die in Abb.

3.7 von DASBERG und BRESLER beschriebenen wassergesättigten Bereiche konnten in den Untersuchungen nicht bestätigt werden (DASBERG und BRESLER 1985). Es wurde vielmehr ein fließender Übergang festgestellt. Da die Wasserspeicherfähigkeit und -verteilung je nach Bodenart und -struktur sehr unterschiedlich ist (DASBERG und BRESLER 1985); (SCHACHTSCHABEL et al. 1989) können aufgrund der häufig nicht exakt zu definierenden Bodenzustände pF-Kurven nur Anhaltswerte über die maximal mögliche Gießwassermenge liefern. Aufgrund von Sackung und Strukturänderungen ist auch während einer Kulturperiode mit einer Veränderung der Wasserspeicherfähigkeit zu rechnen (FISCHER und KALTHOFF); (SCHACHTSCHABEL et al. 1989). Um für den entsprechenden Standort eine Wasserversickerung bei einer maximal möglichen Gießwassermenge auszuschließen, sind deshalb Kontrolltensiometer in den verschiedenen Bodentiefen zur Anpassung der Gießwassermenge einzusetzen (Abb. 3.6).

Wasserumsatz in Abhängigkeit des Matrixpotentials

Die Eignung des Matrixpotentials als Führungsgröße zur Steuerung der Bewässerung wurde bei verschiedenen Gemüsearten (*Lactuca sativa*, *Brassica oleracea* var. *gongylodes*, *Cucumis sativus*, *Ocimum basilicum*) untersucht. Das Bestimmtheitsmaß des Wasserumsatzes in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs (R^2 0,89 bis 0,95) (Tab. 4.4) lag sowohl bei den einzelnen Gießtakten als auch bei der Zusammenfassung aller Gießakte (R^2 0,84 bis 0,93) über dem Bestimmtheitsmaß der klimatischen Faktoren (Abb. 4.48). Der Variationskoeffizient der Steigung der Regressionsgeraden der einzelnen Gießakte lag zwischen 2 % und 14 % und unter denen der klimatischen Faktoren (Tab. 4.19). Versuche zu *Ocimum basilicum* in Töpfen auf Ebbe-Flut Bewässerung (Kap 4.3.3.1) mit einer Steuerung nach dem Matrixpotential bestätigten, dass die Pflanzenentwicklung sowie sich ändernde Klimabedingungen durch die Matrixpotentialmessung automatisch berücksichtigt werden. Die bei Kulturbeginn ursprünglich eingestellten Sollwerte konnten bei allen untersuchten Pflanzenarten während des gesamten Anbauzeitraums beibehalten werden. Bei den tensiometergesteuerten Varianten von *Ocimum basilicum* wurden im Vergleich zu einer einstrahlungsabhängigen Steuerung mit fest vorgegebenen Schaltepunkten die höchsten Erträge erzielt (Abb. 4.36).

Das Matrixpotential ist als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung geeignet. Dies bestätigt das hohe Bestimmtheitsmaß zum Wasserumsatz. Weitere Argumente, das Matrixpotential als Führungsgröße zu benutzen, sind die Übertragbarkeit der Werte auf verschiedene Bodenarten, die vorhandene Messtechnik (Kap 3.2.5.4) und die Möglichkeit, die Sickerwasserbildung durch Tensiometer in verschiedenen Bodentiefen zu überwachen (Kap 3.2.3).

Eine Bewässerungssteuerung nach der in der durchwurzelter Bodenschicht gemessenen Bodenfeuchte ist nicht selbstverständlich ein Garant für eine sickerwasserfreie Bewässerung (Kap.4.3.1.1). Bei einer Optimierung der Gießwassermenge ist daher das Matrixpotential in den nicht durchwurzelter Bodenschichten zu berücksichtigen.

Obwohl die Tensiometrie Schwächen aufweist, ist sie die derzeit geeignetste Messtechnik. Der Messbereich der Tensiometer liegt im Bereich 0 bis 800 hPa und ist im Gegensatz zu den Gipsblockelektroden (Kap. 3.2.5.2) für den Gewächshausanbau zu bevorzugen. Die Matrixpotentialmessung ist im Vergleich zur reinen Leitfähigkeitsmessung, die vom Salzgehalt des Bodens und damit von dem Einfluss ausgebrachter Nährsalze abhängig ist, zu bevorzugen. Auch können im Gegensatz zu den Sensoren der Wassergehaltsbestimmung (TDR-Sonde und kapazitive Meßmethoden (Kap. 3.2.5)) die Sollwerte der Matrixpotentialmessung ohne die Erstellung von Eichkurven auf die verschiedenen Bodenarten und Kulturen weitgehend übertragen werden.

Während bei einer einstrahlungsabhängigen Bewässerungssteuerung ein Sensor für einen Betrieb ausreicht, muss bei einer bodenfeuchteabhängigen Steuerung für jede Pflanzenart und jeden Bewässerungskreis ein Sensor vorgesehen werden. Je nach Kontrollstrategie sind Tensioschalter, die ein potentialfreies Ausgangssignal (an/aus = „Trocken“ oder „Feucht“) liefern und auf einen fest eingestellten Schalterpunkt justiert sind, ausreichend.

Mit Hilfe von elektronischen Tensiometern kann das Matrixpotential kontinuierlich überwacht, aufgezeichnet und in Modell- und Trendrechnungen integriert werden. Der Schalterpunkt kann über die Software vorgegeben und jederzeit auch kurzfristig vom Anwender verändert werden. Aus ökonomischer Sicht sind gegenüber den Tensioschaltern die höheren Kosten der Tensiometer zu berücksichtigen.

Neben den Vorteilen der Matrixpotentialmessung nach dem Tensiometerprinzip müssen die hauptsächlich bauartbedingten Eigenarten der Tensiometrie berücksichtigt werden:

- Die Matrixpotentialmessung ist eine Punktmessung. Der Messbereich ist lokal begrenzt. Die Qualität und Quantität der Messwerte ist vom Messort abhängig. Damit die ausgebrachte Wassermenge vom Sensor erfasst werden kann, ist sowohl für die Bewässerungssteuerung als auch für die Kontrolle der Wasserversickerung als Standort für den Sensor die feuchteste Bodenzone, d.h. bei Tropfbewässerung die unmittelbare Nähe der Tropfstelle zu wählen.
- Die Funktion von Tensiometern ist nur gewährleistet, wenn diese mit Wasser befüllt sind. In Tensiometern können kleinere Wasserverluste durch das Ein- und Auswandern des Wasser bei Matrixpotentialschwankungen auftreten. Größere und vor allem kurzfristige Verluste treten bei Undichtigkeiten, Rissen an dem Tonkörper und bei anhaltend hohem Matrixpotential (>800 hPa) auf.
- Durch Schrumpfung und Sackung des Substrates bzw. Bodens kann es zu einer Kontaktunterbrechung zwischen Bodenmatrix und dem Tonkörper der Tensiometer kommen.
- Werden Tensiometer zur Kontrolle der Wasserbewegung eingesetzt, ist die Installation („Setzen“) der Sensoren mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden. Aufgrund wechselnder Kulturen, Reihenabständen und der Bodenbearbeitung müssen die Sensoren zu Kulturende entfernt und zu Beginn einer neuen Kultur wieder eingebaut werden. Aufgrund der Wartungsarbeiten ist bei Tensiometern eine dauerhafte Installation nicht sinnvoll.

Die einfachste und ökonomischste Möglichkeit, um die Funktionssicherheit der Matrixpotentialmessung über Tensiometer noch weiter zu verbessern, ist die Kontrolle des Sensors über Modellrechnungen (Kap. 5.2).

Weiterhin sind bauliche Veränderungen, wie eine automatische Füllstandskontrolle bzw. der Einsatz von wasserunabhängigen Sensorsystemen (EQUI-Tensiometer; Kap. 3.2.5.1) zu nennen.

Zur Erleichterung der Kontrolle der Wasserbewegung unterhalb der Wurzelzone ist als Verbesserungsvorschlag ein nach dem Matrixpotential messender Multisensor, ähnlich wie das in Kap. 3.2.5.3 beschriebene Meßsystem „ENVIROSCAN“, zu entwickeln.

5.1.2 PFLANZLICHE PARAMETER

Der Wasserumsatz eines Pflanzenbestandes ist wesentlich von dessen Größe abhängig (Kap. 3.3.2). Da es während der Kultur keine zerstörungsfreie Blattflächenbestimmung gibt, wurde versucht, diese anhand von einfach zu messenden Parametern bei verschiedenen Pflanzenarten zu modellieren. Neben der Blattfläche ist die Blatttemperatur im Zusammenhang mit dem Dampfdruck der Luft eine für die Transpiration von Pflanzen wichtige Messgröße (Kap. 3.4.1).

Die Blattflächenentwicklung konnte sowohl bei *Lactuca sativa* I (Abb. 4.23), *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I (Abb. 4.22) und *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* I (Abb. 4.24) durch den einfach zu berechnenden Kulturtag („Anzahl Tage nach Pflanzung“) modelliert werden ($R^2 = 0,95$ bis $0,99\%$).

In einem Blattflächenmodell, in dem der Kulturtag als Berechnungsgrundlage dient, muss aufgrund der jahreszeitlich unterschiedlichen Entwicklungsdauer die Gesamtkulturdauer als zusätzlicher Parameter berücksichtigt werden. So ist z.B. bei *Lactuca sativa* je nach Jahreszeit mit einer Entwicklungsdauer von 100 bis 130 Tagen zu rechnen (FÖRSTER 1980).

Notwendige Pflege- und Schnittmaßnahmen beeinflussen bei *Cucumis sativus*, *Capsicum annuum* und *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* die Blattfläche und erfordern somit eine Korrektur des Blattflächenmodells.

Der in vielen Transpirationsmodellen (STANGHELLINI in (BAKKER et al. 1995)) (Kap. 3.5.3) verwendete Blattflächenindex gibt keine Aussage über die aktive Transpirationsfläche. So sind z.B. bei *Lactuca sativa* zu Kulturbeginn die einzelnen Blätter relativ lose um den Strunk verteilt. Mit zunehmendem Wachstum werden die inneren Blätter eingeschlossen und ergeben somit veränderte Transpirationsbedingungen. An *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* II wurde festgestellt, dass mit dem Alter

der Kultur der Wasserverbrauch pro cm² Blattfläche rückläufig ist (Abb. 4.26; Abb. 4.27). Dies wird auch von EHLERS (Abb. 3.16) bestätigt (EHLERS 1996).

Am Beispiel von Kopfsalat wurde ein statistisch nachweisbarer Einfluss der Sorteneigenschaft auf die Blattflächenentwicklung festgestellt (Abb. 4.25).

In den Modellrechnungen, die das Pflanzenwachstum in Form des Kulturtages und die klimatischen Parameter (Einstrahlungssumme und Sättigungsdefizitssumme) berücksichtigen, konnte das Bestimmtheitsmaß gegenüber den klimatischen Modellen um 0,03 bis 0,09 verbessert werden (Kap. 4.3.4.3). Die Blattfläche erbrachte im Vergleich zum Kulturtag („Anzahl Tage nach Pflanzung“) nur geringfügig höheres Bestimmtheitsmaß von 0,05 bis 0,09.

Aus den oben genannten Gründen ist es ausreichend, in einer möglichen Modellgleichung zur Berechnung des Wasserumsatzes das Pflanzenwachstum als Funktion des Kulturtages zu verwenden. Der Kulturtag kann aus dem Kulturbeginn und dem aktuellen Datum einfach errechnet werden.

Die Blatttemperatur wurde nicht als Führungsgröße zur Steuerung der Bewässerung untersucht, sondern zur Berechnung der Dampfdruckdifferenz, die in Kap 5.1.3 diskutiert wird, verwendet.

Im Vergleich zu den eingesetzten Kontaktthermometern (Tab-A 14) ergaben sich mit der berührungslosen Temperaturmessung nach dem Infrarot-Prinzip (Abb. 4.5; Abb.-A 5) reproduzierbare Messwerte. Auch konnten die Kontaktthermometer nicht zufriedenstellend an den Blättern fixiert werden. Durch Wachstums- und Drehbewegungen der Blätter sowie durch die Blattbewegung bei Wind und Erntearbeiten wurde die Blattfläche häufig durchstoßen (Abb.-A 5). Die von HEIßNER (Abb. 3.21) (HEIßNER 1997) und MACKROTH beschriebenen Differenzen zwischen Luft- und Blatttemperatur konnten bei *Lactuca sativa* II und *Cucumis sativus* I (Abb. 4.30) nicht im gleichen Maße festgestellt werden (MACKROTH 1972).

Ferner wurden je nach Messort durch die Beschattung und Ausrichtung der Blätter zur Sonne sehr unterschiedliche Blatttemperaturen gemessen (z.B. bei *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I; $\Delta T = 8\text{ °C}$ (Abb. 4.28)). Bei der Verwendung der Dampfdruckdifferenz zur Steuerung der Bewässerung ist zu beachten, dass rechnerisch bei einer Abweichung der Blatttemperatur von 1 °C eine Dampfdruckdifferenzänderung von 30 % (Abb. 4.29) entsteht. Durch den Abstand zur Blattfläche kann der Messbereich von berührungslosen Sensoren verändert und damit das Problem etwas entschärft werden (Abb. 5.1).

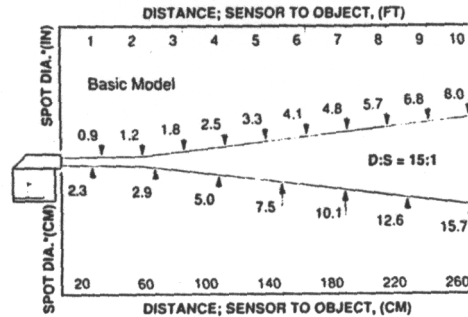


Abb. 5.1: Messfleckdurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zu Objekt eines berührungslosen Temperatursensors (RAYTEC 1992).

Bei den derzeit auf dem Markt angebotenen Infrarot-Sensoren ist zu beachten, dass der Messbereich aufgrund ihrer Einsatzgebiete in Hochöfen bzw. bei der Überwachung von Kugellagern sehr groß (0 bis 1000 °C) ist. Neuere Entwicklungen im Medizinbereich (Fieberthermometer) zeigen, dass es durchaus möglich ist, auch preisgünstige Infrarot-Sensoren, deren Messbereich auf die Körpertemperatur abgestimmt ist, zu entwickeln.

Neben der Möglichkeit kritische Wachstumsbedingungen aufzuzeigen (Stressindex; Kap 3.3.4) kann die Bestandstemperatur wertvolle Informationen für die Klimasteuerung liefern (SCHMIDT 1997). Für eine direkte Messung müssen die Sensorsysteme jedoch stärker auf die Bedürfnisse des Gartenbaus angepasst und geeignete Befestigungsmöglichkeiten entwickelt werden. Um die lokal festgestellten Temperaturdifferenzen auszugleichen, sind mehrere Sensoren bzw. Sensoren mit einem größeren Erfassungsbereich wie z.B. Wärmebildkameras, einzusetzen. Neben der direkten Blatttemperaturmessung sind Blatttemperaturmodelle weiter zu untersuchen.

5.1.3 KLIMATISCHE PARAMETER

Sowohl die Einstrahlung als auch das Sättigungsdefizit wird als Motor der Transpiration bezeichnet. Neben einer direkten Wirkung auf die Öffnungsbewegungen (photoaktive Bewegung) der Stomata (RUGE 1966) wirkt die Strahlung durch die Umwandlung in Wärmestrahlung auf das Sättigungsdefizit und die thermischen Verhältnisse im Gewächshaus.

Einstrahlungssumme

Die Einstrahlung wird meist außerhalb des Gewächshauses über einen Sensor für den ganzen Betrieb erfasst. Es ist festzustellen, dass dadurch die gewächshauspezifischen Einflüsse wie die unterschiedlichen Lüftungs-, Heizungs-, Schattierungs-, Belichtungsstrategien sowie z.B. die Lichtminderung durch das Bedachungsmaterial nicht berücksichtigt werden.

Das Bestimmtheitsmaß des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der ermittelten Einstrahlungssumme lag zwischen -0,15 und 0,55 (Tab. 4.8; Abb. 4.34) und im Vergleich zum Matrixpotential, der Sättigungsdefizitsumme und der Dampfdruckdifferenzsumme am niedrigsten (Abb. 4.48). Der Variationskoeffizient der Steigung der Regressionsgeraden der einzelnen Gießakte lag zwischen 31 % und 98 %, beim Matrixpotential betrug der Variationskoeffizient zwischen 2 % und 14 % (Tab. 4.19).

Es wurde aufgezeigt, dass die Einstrahlungssumme die in der Nacht zwar stark reduzierte, aber dennoch vorhandene Transpiration nicht berücksichtigt (Abb. 4.33).

Die Versuche zu *Ocimum basilicum* zeigen, dass die jeweils zum Gießzeitpunkt des Tensioschalters aufgelaufene Einstrahlungssumme mit dem Kulturfortschritt, aufgrund des gesteigerten Pflanzenwachstums, kontinuierlich absinkt (Abb. 4.37). Diese Untersuchungen bestätigen die von GRAFF und ENDE veröffentlichten Ergebnisse (GRAFF und ENDE 1981). Bei *Lactuca sativa* I und II, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* I konnte der Zusammenhang zwischen dem Kulturtag und der Einstrahlungssumme allerdings nicht festgestellt werden (Abb. 4.35).

Neben der Variation innerhalb einer Pflanzenart, die durch den Variationskoeffizienten der einzelnen Gießakte ausgedrückt wird (Tab. 4.19), sind auch zwischen den Arten, die in verschiedenen Jahreszeiten angebaut wurden, Unterschiede in den Parametern der Regressionsfunktion des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme vorhanden (Tab. 4.19).

Bei einem Anbau im gewachsenem Boden ist eine ausschließliche Steuerung der Bewässerung nach der Einstrahlungssumme nicht zu empfehlen. Dies wird durch das ermittelte Bestimmtheitsmaß belegt. Eine Übertragung und Sollwertempfehlung ist aufgrund der großen Variationskoeffizienten nicht möglich. Trotz der beschriebenen Nachteile ist die einstrahlungsabhängige Bewässerungssteuerung in der gärtnerischen Praxis häufig vorzufinden. Bei der Verwendung von gut gepufferten Substraten bzw. in erdelosen Kulturverfahren und bei einer regelmäßigen Anpassung der Sollwerte werden mit dieser Steuerungstechnik auch zufriedenstellende Ergebnisse erzielt.

Sättigungsdefizit- und Dampfdruckdifferenzsumme

Die Pflanze hat keine internen Mechanismen zur Erhöhung des Wasserpotentials. Treibende Kraft für den Wassertransport sind abfallende Wasserpotentialgradienten (MOHR und SCHOPFER 1992). Das Wasserpotential der Luft (Ψ_L) bzw. die Potentialdifferenz zwischen dem Blatt und der dem Blatt ungebundenen Luft ist für die Höhe des Transpirationsstromes die entscheidende Größe.

Zur Berechnung der Sättigungsdefizit- und der Dampfdruckdifferenzsumme wurden die Messwerte des jeweiligen Klimaabteils, in der sich die entsprechende Bewässerungseinheit befindet, verwendet. Dadurch werden im Vergleich zur Einstrahlungssumme die internen Klimaverhältnisse berücksichtigt.

Das Bestimmtheitsmaß des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Sättigungsdefizitsumme lag zwischen 0,46 und 0,84 (Tab. 4.11, Abb. 4.42). Der Variationskoeffizient der Steigung der Regressionsgeraden der einzelnen Gießtakte zwischen 18 und 42 % (Tab. 4.11). Im Gegensatz zur Einstrahlungssumme (Abb. 4.35) zeigen die Sättigungsdefizitsummen (Abb. 4.43) zum Bewässerungszeitpunkt einen systematischen Verlauf zu der Kulturdauer, so dass in einer Bewässerungssteuerung eine Modellierung bzw. eine Trendanalyse bereits ausgeführter Gießtakte eine Anpassung der Sollwerte ermöglicht.

Im Gegensatz zur Einstrahlungssumme geht in die Sättigungsdefizitsumme auch der Wasserumsatz der Nachtstunden ein. Die nachts vorhandenen Schließbewegung der Stomata wird jedoch nicht berücksichtigt und es kommt damit zu einer Überschätzung des Wasserverbrauches (Abb. 4.41).

Für die Berechnung der Sättigungsdefizitsumme ist eine exakte Luftfeuchtemessung notwendig. Unter praxisüblichen Bedingungen ist zu berücksichtigen, dass mit einer Abweichung von $\pm 3\%$ zu rechnen ist und damit rechnerisch eine Sättigungsdefizitänderung von $\pm 15\%$ (Abb. 5.2) auftreten kann.

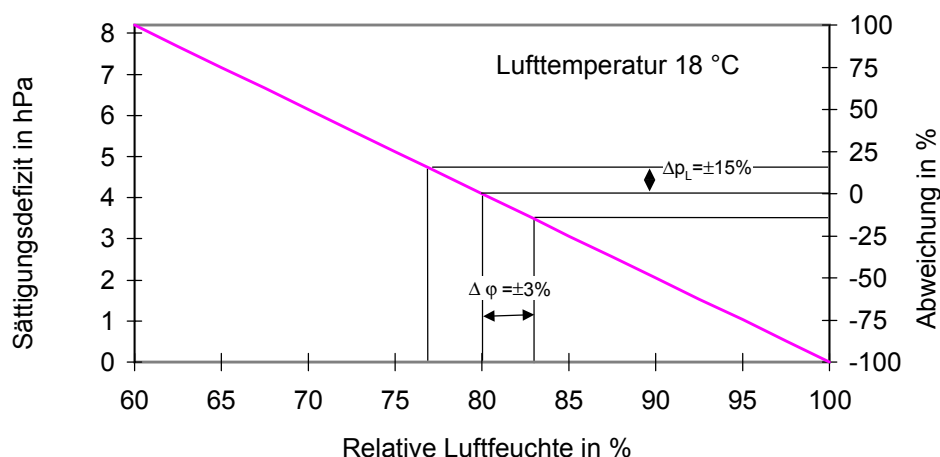


Abb. 5.2: Einfluss der Messgenauigkeit der relativen Luftfeuchte auf das Sättigungsdefizit.

Bei der Verwendung der Sättigungsdefizitsumme zur Steuerung der Bewässerung ist eine regelmäßige Kontrolle und Kalibrierung der Luftfeuchtesensoren notwendig. So können sich mögliche Messfehler (STRAUCH 1992) zu Problemen in der Kulturführung auswirken.

Für die Berechnung der Dampfdruckdifferenzsumme ist zusätzlich die Blatttemperatur zu messen. Sie zu erfassen ist wie in Kap 5.1.2 bereits besprochen, nicht ganz unproblematisch.

Das Bestimmtheitsmaß des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenzsumme lag zwischen 0,52 und 0,60 (Tab. 4.13) und war nicht wesentlich höher als die der Sättigungsdefizitsumme (0,46 bis 0,84) (Tab. 4.11; Abb. 4.48).

Aus physikalischer Sicht ist die Dampfdruckdifferenzsumme zwischen Blatttemperatur und Lufttemperatur der Sättigungsdefizitsumme als Triebkraft für die Transpiration vorzuziehen (Kap. 3.4.1). Aufgrund des messtechnisch noch sehr hohen Aufwandes zur Blatttemperaturmessung und des nur geringfügig höheren Bestimmtheitsmaß im Vergleich zur Sättigungsdefizitsumme, ist sie derzeit allerdings für eine Steuerung der Bewässerung nur im Versuchsbetrieb zu empfehlen.

5.1.4 KOMBINATION PFLANZLICHE UND KLIMATISCHE PARAMETER

Da die Transpiration nicht nur von einer Größe wie z.B. der Blattfläche, der Einstrahlung oder dem Sättigungsdefizit beeinflusst wird und auch die einzelnen, in den experimentellen Untersuchungen dargestellten Parameter im Vergleich zur Matrixpotentialmessung ein geringeres Bestimmtheitsmaß zeigten, wurden mehrfaktorielle Regressionsanalysen durchgeführt.

Das Bestimmtheitsmaß der einzelnen Faktoren lag bei der Einstrahlungssumme zwischen -0,15 und 0,55 (Tab. 4.8; Tab. 4.19) und bei der Sättigungsdefizitsumme zwischen 0,46 und 0,84 (Tab. 4.11, Tab. 4.19). Eine Kombination von Einstrahlungs- und Sättigungsdefizitsumme ergab ein Bestimmtheitsmaß zwischen 0,71 und 0,84 (Tab. 4.14). So wurde ein etwas niedrigeres Bestimmtheitsmaß wie beim Matrixpotential (0,84 bis 0,93) (Tab. 4.4) erreicht und gegenüber denen der einzelnen Messgrößen wesentlich verbessert. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Einstrahlung das Öffnungsverhalten der Stomata (Kap. 3.3.1) bzw. der stomatäre Widerstand und die Sättigungsdefizitsumme die Triebkraft der Transpiration (Kap. 3.4.1) im wesentlichen darstellen.

Durch die Kombination des Pflanzenwachstums in Form der „Tage nach Pflanzung“ (Kulturtag) der Einstrahlungs- und Sättigungsdefizitsumme konnte das Bestimmtheitsmaß noch geringfügig verbessert werden ($R^2=0,77$ bis 0,89) (Tab. 4.16). Zwischen einem Blattflächenmodell und dem Kulturtag wurden keine weiteren, wesentlichen Verbesserung erreicht (Tab. 4.17).

5.2 KONTROLLSTRATEGIEN ZUR BEWÄSSERUNGSSTEUERUNG

Die Kontrollstrategie ist der Algorithmus bzw. die Gesetzmäßigkeit zur Beeinflussung einer Regelgröße. Da der Wasserverbrauch nicht direkt gemessen wird können die entsprechenden Führungsgrößen nur Hilfsgrößen zur Beschreibung des Wasserumsatzes sein.

Bei einem Anbau im gewachsenem Boden muss die Kontrollstrategie zur Steuerung der Bewässerung den Wasserverbrauch eines Pflanzenbestandes exakt wiedergeben, so dass eine Sickerwasserbildung ausgeschlossen werden kann (Tab. 2.6).

Zur Verhinderung von Sickerwasser ist die Gießwassermenge der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens anzupassen. Da eine theoretische Berechnung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens unter einer Tropfstelle nur bedingt möglich ist (Kap 5.1.1) muss bei allen in Frage kommenden Kontrollstrategien die Gießwassermenge durch eine regelmäßige Kontrolle der Feuchteverhältnisse unterhalb der Wurzelzone angepasst werden.

Für die in den experimentellen Untersuchungen dargestellten Parameter werden nachfolgend verschiedene Kontrollstrategien dargestellt.

Matrixpotential als Führungsgröße

Das Matrixpotential ist im Gegensatz zu den einzelnen klimatischen Parametern direkt als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung beim Anbau im gewachsenem Boden und in Substraten geeignet. Das Signal von Tensioschaltern bzw. Tensiometern dient nur dazu um den Bewässerungstakt einzuleiten. Eine Einhaltung und kontinuierliche Einregelung des Feuchtegehaltes und damit eine Veränderung der Gießwassermenge ist aufgrund folgender Punkte nur bedingt möglich:

- Verzögerte Wasserbewegung und -verteilung im Boden.
- Mangelnde Verteilgenauigkeit der Tropfsysteme bei zu geringen Wassermengen.
- Einschränkung des Wurzelvolumens bei zu geringen Wassermengen.
- Gefahr der Wasserversickerung und damit Nährstoffaufträge bei zu hohen Wassermengen.

Als Kontrollstrategie ist eine 2-Punkt-Regelung mit einer zeitlichen Verzögerung einzusetzen (Abb. 5.3). Die Wassermenge pro Gießvorgang ist vom Anwender vorzugeben. Diese kann allerdings über ein entsprechendes Softwaremodul (Abb. 5.4), das den hydraulischen Gradienten (Kap.3.2.3) unterhalb der durchwurzelten Bodenschicht berücksichtigt, automatisch angepasst werden. Dabei sind die systembedingten Mindestmengen und bei einer Düngung nach dem Konzentrationskonzept evt. Auswirkungen auf die Nährstoffversorgung zu berücksichtigen.

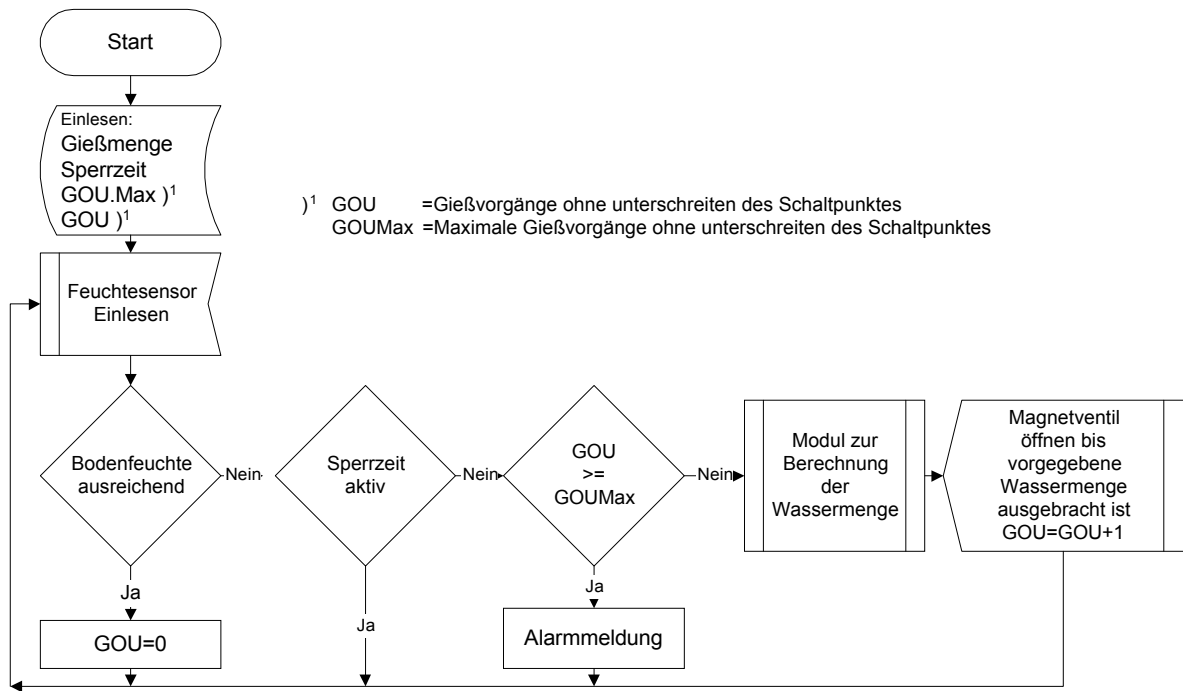


Abb. 5.3: Flussdiagramm zur Bewässerungssteuerung über Matrixpotentialmessung und automatischer Anpassung der Gießmenge in Abhängigkeit der Feuchteverhältnisse unterhalb der Wurzelzone.

Nach einem Bewässerungsvorgang muss eine „Sperrzeit“ eingehalten werden. Während dieser Sperrzeit kann sich das ausgebrachte Wasser verteilen. Sollte der Sensor nach der Sperrzeit den eingestellten Sollwert nicht unterschreiten, war die Gießmenge zu gering oder wurde vom Sensor nicht registriert (z.B. zu großer Abstand zur Tropfstelle). Damit in diesem Fall die Gießvorgänge nicht endlos fortgeführt werden, muss die maximale Anzahl der Gießvorgänge begrenzt (GOUMax; Abb. 5.3) und bei Überschreiten eine Alarrmeldung ausgegeben werden.

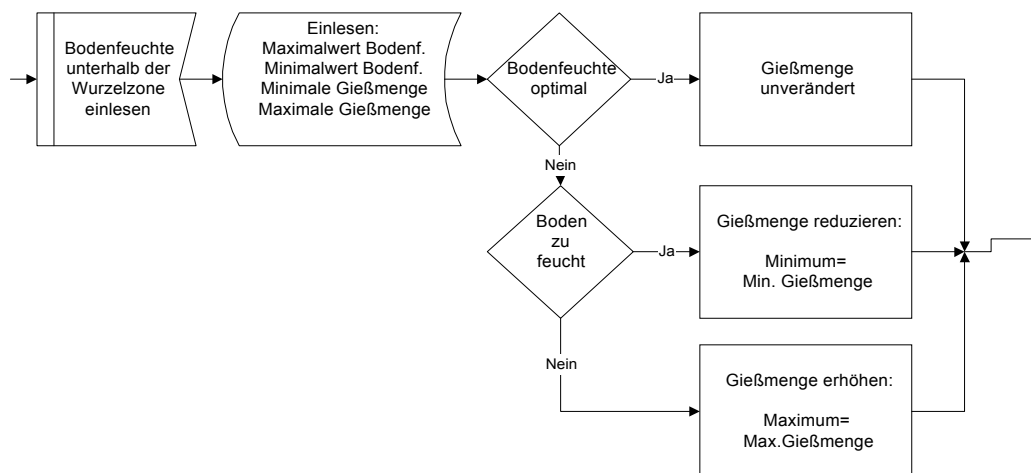


Abb. 5.4: Modul zur Berechnung der Wassermenge pro Gießvorgang unter Berücksichtigung der Matrixpotentialverhältnisse unterhalb der Wurzelzone.

Steuerung nach der Einstrahlungssumme

Die Einstrahlungssumme hatte das niedrigste Bestimmtheitsmaß zum Wasserumsatz und ist als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung ohne zusätzliche Anpassung bei einem Anbau im gewachsenem Boden nicht geeignet. Im einfachsten Fall wird bei dem Erreichen des vorgegebenen Sollwertes ein Gießvorgang ausgelöst (Abb. 5.5).

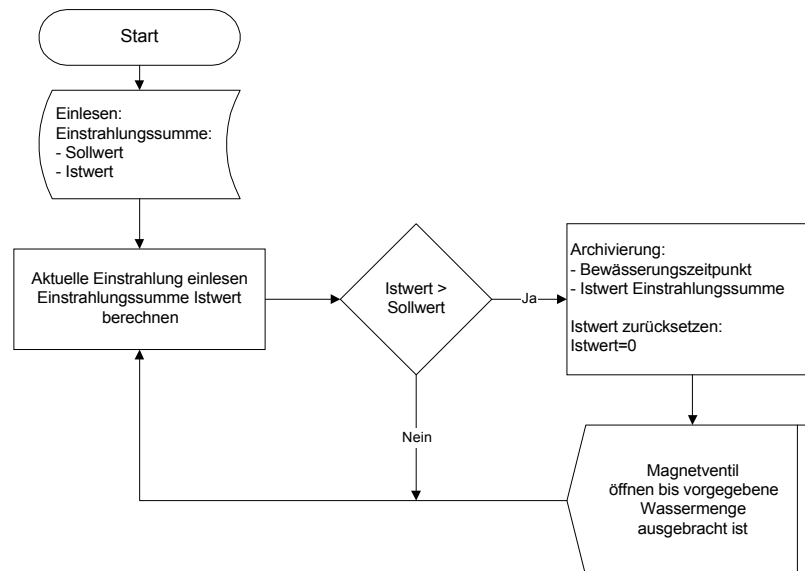


Abb. 5.5: Flussdiagramm zur einstrahlungsabhängigen Bewässerungssteuerung.

Um diese Kontrollstrategie zu optimieren, können die archivierten Einstrahlungssummen bereits ausgeführter Gießakte herangezogen werden. Bei *Ocimum basilicum* (Abb. 4.35) konnte ein kontinuierliches Absinken mit dem Kulturfortschritt festgestellt werden. Eine Matrixpotentialmessung über sog. Kontrolltensiometer und das Pflanzenwachstum können weitere Hilfsgrößen zur Optimierung sein.

Steuerung nach der Sättigungsdefizitsumme

Für eine Steuerung nach der Sättigungsdefizitsumme kann das gleiche Schema wie für die Einstrahlungssumme (Abb. 5.5) verwendet werden.

Bei diesem Verfahren handelt es sich wie bei der Einstrahlungssumme um eine Steuerung, bei der weder die Bodenfeuchte noch das Pflanzenwachstum berücksichtigt wird. Im Vergleich zur Einstrahlungssumme lag das Bestimmtheitsmaß der Sättigungsdefizitsumme höher (Tab. 4.18) und der Variationskoeffizient niedriger (Tab. 4.19). Da die Sättigungsdefizitsumme aus der Lufttemperatur und der Luftfeuchte in dem jeweiligen Gewächshaus berechnet wird, ist im Gegensatz zur Einstrahlungssumme eine veränderte Klimaführung berücksichtigt. Für eine Optimierung ist auch in diesem Fall der Anwender verantwortlich. Hilfen für eine Optimierung können die Summen bereits ausgeführter Gießakte, eine Matrixpotentialmessung und eine Adaptionfunktion, in der die mit dem Pflanzenwachstum

veränderten Sättigungsdefizitsummen berücksichtigt werden, sein. In den experimentellen Untersuchungen konnte ein hohes Bestimmtheitsmaß für die Sättigungsdefizitsumme in Abhängigkeit der Kulturdauer errechnet werden (Abb. 4.43).

Um die Sättigungsdefizitsumme für die entsprechende Bewässerungseinheit berechnen zu können, muss in der Bewässerungssteuerung die Temperatur und Luftfeuchte des Standortes, die meist ohnehin zur Klimasteuerung erfasst wird, zur Verfügung stehen.

Kombination mehrerer Einzelgrößen

Obwohl die Matrixpotentialmessung als Führungsgröße zur Steuerung der Bewässerung gut geeignet ist, sollten zur weiteren Optimierung zusätzlich klimatische Messgrößen in die Bewässerungssteuerung integriert werden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass bei einem Anbau in inerten Substraten wie z.B. Steinwolle die Matrixpotentialmessung nicht möglich ist. In einer Kontrollstrategie ist das Matrixpotential, die Einstrahlungssumme, die Sättigungsdefizitsumme und der Gießabstandes zu kombinieren. Durch eine entsprechende Verknüpfung der verschiedenen Führungsgrößen (Abb. 5.6) sollte es möglich sein, sowohl eine Einzelgrößenregelung (bodenfeuchte-, einstrahlungs-, sättigungsdefizit- oder zeitabhängig) als auch eine Mehrgrößenregelung einzustellen.

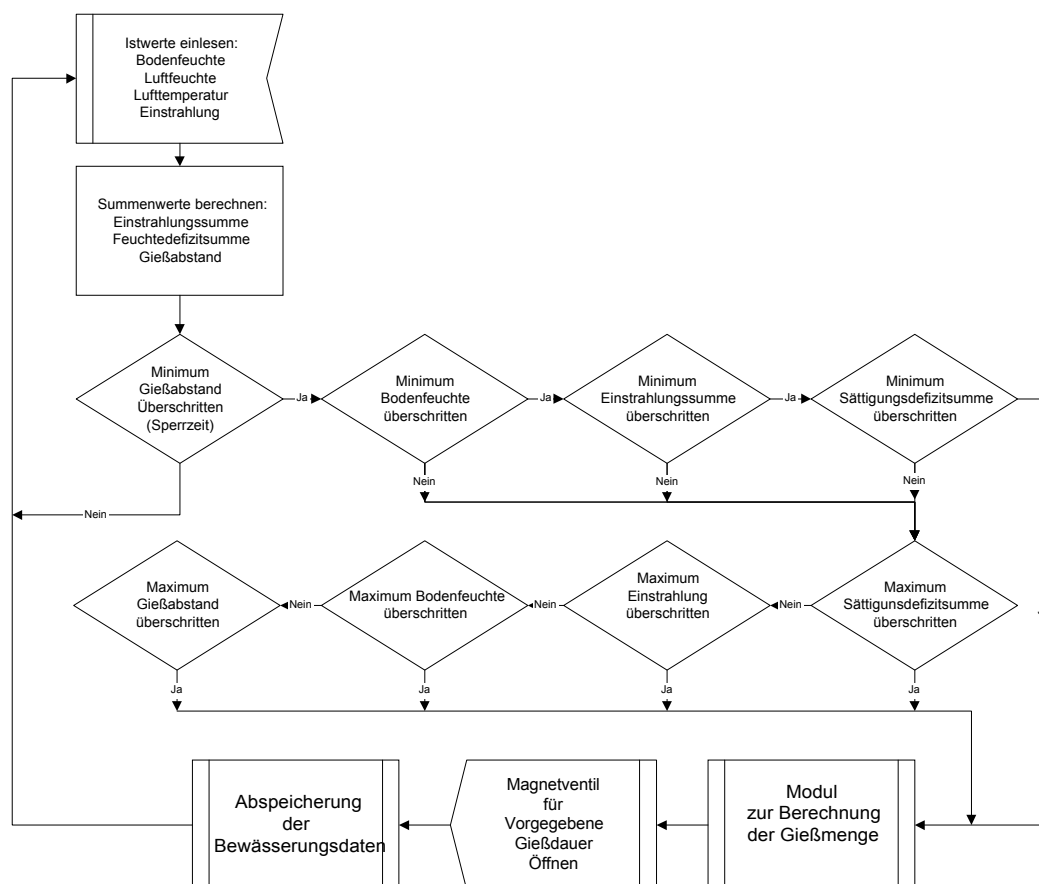


Abb. 5.6: Algorithmus zur Steuerung der Bewässerung nach mehreren Einflussgrößen.

Zur Auslösung eines Bewässerungsimpulses müssen entweder alle vorgegebenen Minima oder ein Maxima überschritten sein. Die zeitliche Minimumbegrenzung (Sperrzeit) nimmt eine Sonderstellung ein. Ist der minimale Gießabstand nicht erreicht kann kein Bewässerungsimpuls ausgelöst werden; obwohl alle Minima oder ein Maximum überschritten ist. Damit die vom Anwender vorgegebenen Minimalwerte nicht durch einen zu niedrig gewählten Maximalwert außer Kraft gesetzt werden; muss der Anwender über ein entsprechendes Softwaremodul informiert werden, welcher Grenzwert letztendlich den Gießvorgang ausgelöst hat.

Damit die in (Abb. 5.6) vorzugebenden Parameter nicht ständig vom Anwender kontrolliert und angepasst werden müssen, können diese automatisch innerhalb vorgegebener Grenzwerte angepasst werden. Dazu sind Regressions- und Trendanalysen bereits ausgeführter Gießakte notwendig. Bei der Einstrahlungssumme (Abb. 4.35, Abb. 4.37) und der Sättigungsdefizitsumme (Abb. 4.43) sind teilweise gute Zusammenhänge mit der Kulturdauer vorhanden. Sind die Bodenfeuchteverhältnisse optimal, können die klimatischen Parameter entsprechend angepasst werden.

In Abb. 5.7 ist eine Methode (Trendrechnung aus den letzten 2 bzw. 3 Wertepaaren) zur automatischen Adaption der Sättigungsdefizitsummen dargestellt.

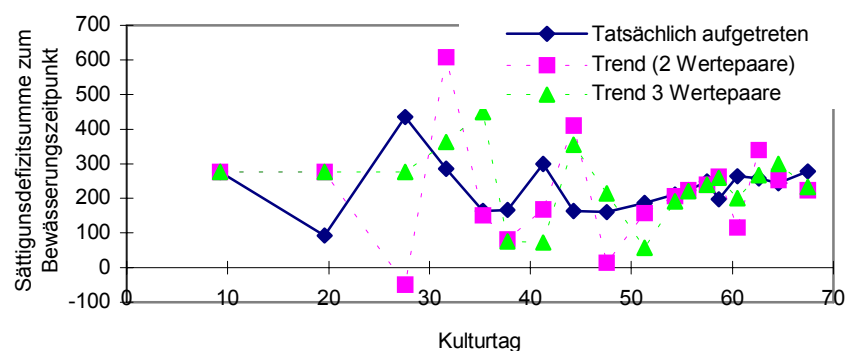


Abb. 5.7: Tatsächlich aufgetretene Sättigungsdefizitsumme und Trendrechnungen der letzten zwei und letzten drei Wertepaare bei *Lactuca sativa* II.

Es ist festzustellen, dass die Einstrahlungssummen und die Sättigungsdefizitsummen (Abb. 4.35, Abb. 4.43), der direkt nach einer Pflanzung ausgeführten Gießvorgänge, die Regressionsfunktion bzw. eine Trendrechnung stören und sollten deshalb nicht berücksichtigt werden.

5.3 KLIMA- UND BEWÄSSERUNGSSTEUERUNG IN EINEM PROZESSLEITSYSTEM

Für eine Umsetzung der beschriebenen Kontrollstrategie (Abb. 5.6) ist eine Kombination von klimatischen, bodenphysikalischen und kulturspezifischen Messdaten notwendig. Die Sättigungsdefizitsumme und die Einstrahlungssumme kann ohne zusätzlichen messtechnischen Aufwand aus den vorhandenen und zur Klimatisierung notwendigen Messwerten (Tab. 2.1) Lufttemperatur; Luftfeuchte und Einstrahlung berechnet werden (Kap 3.4.1).

Zur Integration neuer Führungsstrategien sind flexible Hard- und Softwaresysteme notwendig. Wurden früher Prozessleitsysteme nur zur optimalen Steuerung und Regelung fest vorgegebener Aufgabenstellungen eingesetzt; sind in Zukunft zur Integration von Modellrechnungen die Datenarchivierung und Datenvisualisierung verstärkt in die Leitrechnersysteme zu integrieren (Abb. 5.8). Die in den verschiedenen Prozessen ermittelten Zustände und Messwerte müssen dabei allen Teilprozessen zur Verfügung stehen.

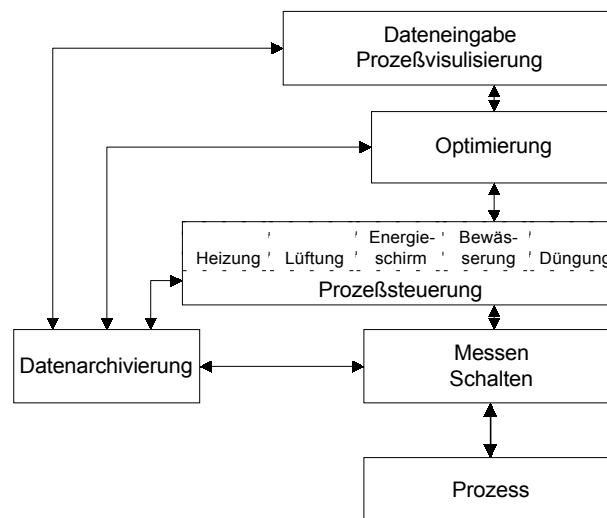


Abb. 5.8: Baugruppen eines Prozessleitsystems zur Steuerung von Klima und Bewässerung

In vielen Prozessleitsystemen ist bereits die Hardware für die Bewässerungs- und Klimasteuerung in einem Prozessleitsystem integriert. Somit muss eine weitere Verknüpfung auf Softwareebene stattfinden. Die Daten der einzelnen Teilprozesse müssen über entsprechende Datenbanken untereinander kombiniert und verknüpft werden können. Eine mögliche Struktur wird in Abb. 5.9 dargestellt.

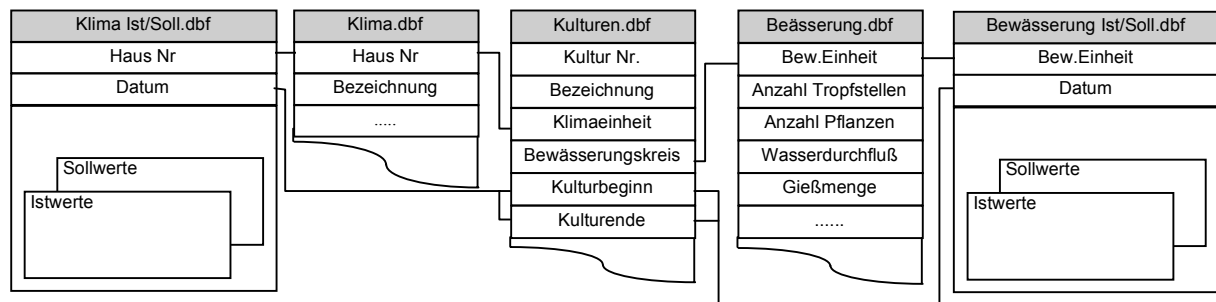


Abb. 5.9: Datenbanksystem zur Verknüpfung von Klima- und Bewässerungssteuerung.

Bei einem gesicherten Datenaustausch zwischen den Teilprozessen ist der Hardwareaufbau für den Anwender zweitrangig. Sind die Datenprotokolle bekannt, können auch bereits vorhandene Systeme untereinander verknüpft und somit bereits wertvolle Entwicklungen und gut funktionierende Systeme weiter genutzt werden.

Personalcomputer erfüllen alle Funktion wie sie in der Prozessführung benötigt werden. Aufgrund der starken Verbreitung der PC-Systeme kann der Anwender und Entwickler mit vertrauten und bekannten Produkten arbeiten. Durch die Integration preisgünstiger Zusatzprodukte wie z.B. Netzwerke, Modems u.a. kann kostspielige Hard- und Softwareentwicklung eingespart werden. Ein weiterer, großer Vorteil ist in einer schnellen Aktualisierung und Verwaltung der Software zu sehen. Bei einem Prozessleitsystem auf der Basis von Personal Computern (SCHÖN 1993) muss sichergestellt werden, dass in einer garantierten Mindestzeit auf eine Vielzahl von Prozesszuständen reagiert werden kann. Das Betriebssystem des Rechners muss einen quasiparallelen Ablauf mehrerer Programme (Multitasking) ermöglichen. Durch einen modularen Softwareaufbau und eine zentrale Softwareverwaltung auf einem PC ist es möglich, neue Strategien kurzfristig in die Praxis umzusetzen.

Als mögliches Beispiel wird das in Zusammenarbeit zwischen der Firma Positronik und dem Institut für Gemüsebau an der FH Weihenstephan entwickelte Prozessleitsystem, das einen IBM-kompatiblen PC als Prozessrechner verwendet, vorgestellt (Abb. 5.10). Der PC übernimmt sowohl die Steuer- und Regelaufgaben, die Datenarchivierung und die Prozessvisualisierung. Die Sensoren und Aktoren werden an die dezentralen In- und Outputkarten (I/O-Units), die über ein 2-Draht-Bussystem mit dem PC kommunizieren, angeschlossen. Durch den dezentralen und modularen Aufbau sind die Kabellängen zu den Sensoren und Aktoren minimiert. Die Outputkarten (Abb.-A 8) verfügen über 4 bzw. 8 Wechselkontakte (230 V/8A) und 4 bzw. 8 digitale Eingänge, die auch als Impulszähler konfiguriert werden können. Die 8 Eingangskanäle der Inputkarten können je nach Bedarf an gängige Sensorsysteme (0..20 mA; 4..20 mA; +5V..-5V; usw.) angepasst werden. Der Temperatur-Luftfeuchte-Sensor (Abb.-A 7), der zusätzlich über 8 potentialfreie Eingänge verfügt, wird direkt an das Bussystem angeschlossen.

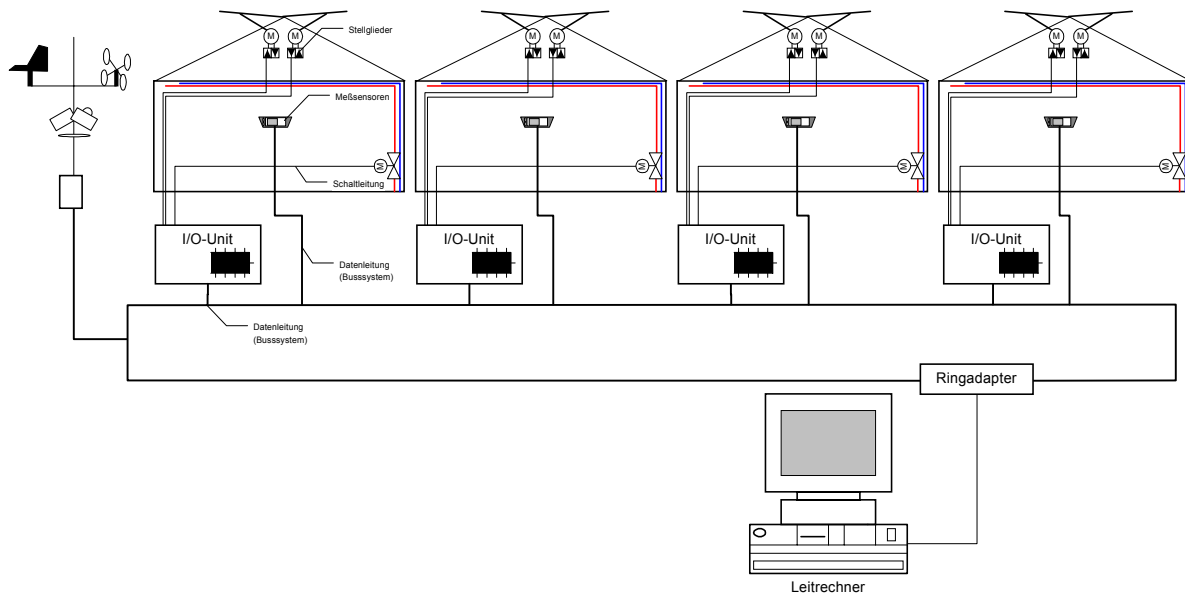


Abb. 5.10: Schematischer Aufbau des dezentralen Prozessleitsystems mit zentraler Intelligenz der Firma Positronik.

Um den Prozessrechner zu entlasten wurden die I/O-Units mit einem eigenen Prozessor ausgerüstet. Dieser übernimmt das rechtzeitige An- und Abschalten der Relais und entlastet somit den Prozessrechner, der mit der Abarbeitung weiterer Routinen fortfahren kann.

Damit neben der Prozesssteuerung parallel eine Dateneingabe und Visualisierung möglich ist, muss der Prozessrechner (Leitrechner) entweder mit einem multitaskingfähigen Betriebssystem oder in ein Netzwerk eingebunden sein. So ist die Dateneingabe und -visualisierung über einen zweiten PC möglich.

Neben den Verbesserungen in den Kontrollstrategien ist die Benutzerfreundlichkeit der Prozessleitsysteme weiter zu verbessern. Aufgrund der Vielzahl von Parametern (TANTAU 1990) ist der Gärtner häufig überfordert alle ihm angebotenen Funktionen zu nutzen.

Einen Vorschlag zu Verbesserung der Bedienerfreundlichkeit stellt eine Sollwertvorgabe in einer sog. Sollwerttabelle (Abb. 5.11) dar. Der Anwender kann zu Kulturbeginn einen Fahrplan festlegen bzw. diesen aus bereits abgeschlossenen und archivierten Tabellen aktivieren.

| Datum | Heizung | | Lüftung | |
|------------|---------|-------|---------|-------|
| | Tag | Nacht | Tag | Nacht |
| 01.01.1997 | 14 °C | 12 °C | 18 °C | 20 °C |
| 02.01.1997 | 14 °C | 12 °C | 18 °C | 20 °C |
| 03.01.1997 | 14 °C | 12 °C | 18 °C | 20 °C |
| 04.01.1997 | 14 °C | 12 °C | 18 °C | 20 °C |
| 05.01.1997 | 14 °C | 12 °C | 18 °C | 20 °C |
| 06.01.1997 | 14 °C | 12 °C | 18 °C | 20 °C |
| 07.01.1997 | 14 °C | 12 °C | 18 °C | 20 °C |
| 08.01.1997 | 10 °C | 6 °C | 18 °C | 20 °C |
| heute | 10 °C | 6 °C | 18 °C | 20 °C |
| 10.01.1997 | 10 °C | 6 °C | 18 °C | 20 °C |
| 11.01.1997 | 10 °C | 6 °C | 18 °C | 20 °C |
| 12.01.1997 | 10 °C | 6 °C | 18 °C | 20 °C |
| 13.01.1997 | 10 °C | 6 °C | 18 °C | 20 °C |
| 14.01.1997 | 8 °C | 6 °C | 16 °C | 18 °C |
| 15.01.1997 | 8 °C | 6 °C | 14 °C | 16 °C |
| 16.01.1997 | 8 °C | 6 °C | 12 °C | 14 °C |
| 17.01.1997 | 8 °C | 6 °C | 12 °C | 14 °C |
| 18.01.1997 | 8 °C | 6 °C | 12 °C | 14 °C |
| 19.01.1997 | 8 °C | 6 °C | 12 °C | 14 °C |
| 20.01.1997 | 8 °C | 6 °C | 12 °C | 14 °C |

Abb. 5.11: Tabellarische Sollwerteingabe zur Verbesserung der Bedienfreundlichkeit.

Durch selbst adaptierende Regelstrategien und Modellrechnungen können die vorzugebenden Regelparameter weiter reduziert werden (TANTAU 1990). Übertragen auf die Bewässerungssteuerung sind dies z.B. ein Modul zur automatischen Adaption der maximal möglichen Gießwassermenge (Abb. 5.4) und Anpassung der Sollwerte aufgrund von Trendanalysen (Abb. 5.7). Andererseits muss es dem Anwender möglich sein, die Führungsstrategien aufgrund von äußere Einflüssen (Klimaschwankungen, Pflanzenschutzmaßnahmen, Marktsituation) kurzfristig zu ändern. Die von vielen Anwendern geforderte Flexibilität steht häufig im Zielkonflikt mit der geforderten Reduzierung der einzustellenden Parameter.

Um neue Kontrollstrategien in die Praxis einzuführen, müssen dem Anwender die Wechselwirkung der verschiedenen Einflussgrößen auf einen Prozess aufgezeigt werden. Die Datenvisualisierung muss weiter ausgebaut werden.

Obwohl Vertreter der Gewächshauscomputerhersteller wie z.B. VAN DEN BOSCH für die Einführung von modellgeführten Regelstrategien nur eine Chance sieht, wenn diese auf alle Pflanzenarten und Anbauverfahren zu übertragen sind, so sind die Vorteile wie z.B. bei einer Kombination in der Bewässerungssteuerung und damit eine höhere Funktionssicherheit wichtige Gründe für diese Regelstrategien (VAN den BOSCH 1998). Modellgeführte Regelstrategien führen zu einer sehr ruhigen, schwingungsfreien und energiesparenden Regelung (SCHMIDT 1997).

Ein weiterer Vorteil der Kombination von Klima und Bewässerungssteuerung in einem Prozessleitsystem besteht in der Möglichkeit, zusammenfassende Auswertung anzufertigen und damit Kulturfehler zu analysieren. Die zentrale Dateneingabe, Verwaltung und Ausgabe bringt Übersichtlichkeit und spart Arbeitszeit.

5.4 PROZESSSTEUERUNG ALS TEILBEREICH DER COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURE

Die für ein CIM (HASHIMOTO 1993) (Abb. 5.12) notwendigen Hardwarekomponenten können aufgrund der angebotenen Zusatzprodukte wie z.B. Netzwerke ohne Probleme verbunden werden.

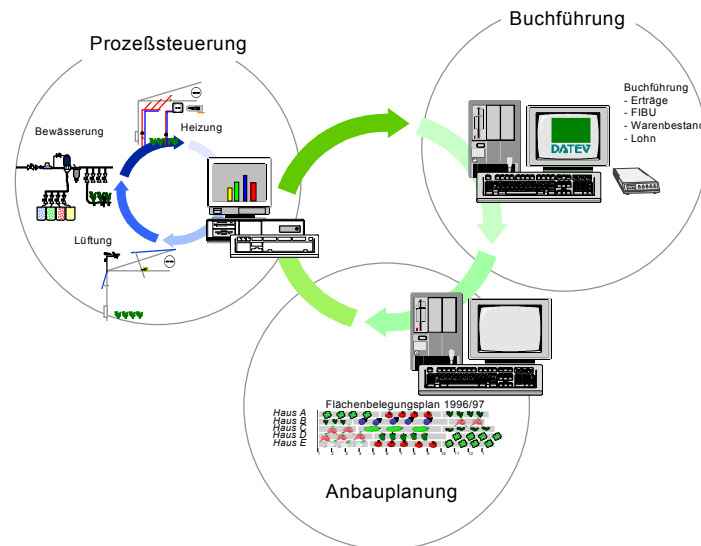


Abb. 5.12: Datenströme und Teilgebiete einer EDV-unterstützten Betriebsführung

Ein weitaus größeres Problem ist es gemeinsame Schnittstellen zwischen den Softwareprodukten (Prozesssteuerung, Betriebsführung und Anbauplanung) zu schaffen. Damit sich der Anwender einen Überblick über die angebauten Kulturen verschaffen kann, muss er bisher den vom Bewässerungscomputer erfassten Wasser- und Nährstoffverbrauch, die Erträge über Rechnungs- bzw. Lieferscheine, die Klimaführung über den Klimacomputer, die Vorkultur und Pflanzenschutzmaßnahmen über die Schlagdatei von Hand zusammenfassen. Da dies häufig große Anstrengungen und Arbeitszeit erfordert, entfällt eine derartige Analyse und somit verlieren die in den Teilprozessen wertvollen Prozessdaten an Wert und eine weitere Optimierung ist somit häufig nicht möglich.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Zur Optimierung der Bewässerungssteuerung ist die Integration von klimatischen Messgrößen bzw. die Kombination von Klima- und Bewässerungssteuerung in einem Prozessleitsystem sinnvoll und notwendig. Die wesentlichen Einflussgrößen auf den Wasserverbrauch von Pflanzen sind klimatischer Art, die Pflanze selbst und der Wasserhaushalt des Bodens. Als wichtige klimatische Einflussgrößen sind das Sättigungsdefizit der Luft bzw. die Dampfdruckdifferenz zwischen Blatt und Luft und die Einstrahlung, die sowohl das Gewächshausklima als auch direkt auf die Öffnungs- und Schließbewegung der Stomata wirkt, zu nennen.

Die Bindungskräfte des Wassers im Boden wurden von 2 Seiten betrachtet. Neben dem Zusammenhang mit dem Wasserumsatz ist bei dem Anbau im gewachsenem Boden eine mögliche Sickerwasserbildung und damit eine Nährstoffauswaschung zu beachten.

Die im Gewächshausanbau eingesetzten Prozessleitsysteme berücksichtigen die Wechselwirkungen der Einflussfaktoren auf den Wasserumsatz eines Pflanzenbestandes nicht. So wird zwar die Einstrahlungssumme zur Steuerung der Bewässerung verwendet, eine Anpassung der Parameter muss allerdings von Anwender selbst vorgenommen werden.

Zur Ableitung möglicher Zusammenhänge wurde in den experimentellen Untersuchungen der Wasserumsatz in Abhängigkeit der Bodenfeuchte (Matrixpotential), der klimatischen Größen (Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme und Dampfdruckdifferenzsumme) an *Lactuca sativa*, *Brassica oleracea* var. *gongylodes* und *Cucumis sativus* untersucht. Der Wasserverbrauch wurde über elektronische Waagen kontinuierlich gemessen und mit den beschriebenen klimatischen Größen, dem Matrixpotential und dem Pflanzenwachstum in Beziehung gesetzt. Neben der Analyse einzelner Gießakte wurden alle während der Kulturzeit ausgeführte Bewässerungsvorgänge zusammengefasst. Als Maß für die Eignung einer Messgröße als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung dienten das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktionen der einzelnen Gießakte, aller Gießakte zusammengefasst und der Variationskoeffizient der Steigung der Regressionsfunktionen der einzelnen Gießakte. Um bei dem Einsatz der Tropfbewässerung bei der Kultur im gewachsenem Boden eine Wasserver-sickerung zu verhindern, wurden zusätzliche Untersuchungen zur Wasserverteilung in und um die Tropfstelle durchgeführt.

Bei der Betrachtung der einzelnen Messgrößen wurde das höchste Bestimmtheitsmaß zum Wasserumsatz bei dem Matrixpotential (0,84 bis 0,93) festgestellt. Das niedrigste Bestimmtheitsmaß bei der Einstrahlungssumme (-0,15 bis 0,55). Bei der Sättigungsdefizitsumme war das Bestimmtheitsmaß 0,46 bis 0,80. Das Bestimmtheitsmaß der Dampfdruckdifferenzsumme, für die zusätzlich eine Blatttemperaturmessung erforderlich ist, lag zwischen 0,52 und 0,6.

Da das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktionen der einzelnen Gießakte bei der Einstrahlungssumme, der Sättigungsdefizitsumme und der Dampfdruckdifferenzsumme höher als die aller zusammengefasst waren wurde zusätzlich die Abhängigkeit der zum Bewässerungszeitpunkt aufgelaufenen Summen von der Kulturdauer untersucht. Dabei wurde bei der Einstrahlungssumme der geringste Zusammenhang festgestellt.

Der Variationskoeffizient der Steigung der Regressionsfunktionen der einzelnen Gießakte war bei dem Matrixpotential mit 10 % am niedrigsten und bei der Einstrahlungssumme mit 62 % am höchsten. Die Sättigungsdefizitsummen hatten einen Variationskoeffizienten von 30%, die Dampfdruckdifferenzsumme von 13%.

Aus physikalischer Sicht ist zur Beschreibung der treibenden Kraft für die Transpiration die Dampfdruckdifferenzsumme der Sättigungsdefizitsumme vorzuziehen. Da für die Dampfdruckdifferenzsumme allerdings eine Blatttemperaturmessung notwendig ist und diese aufgrund des Messortes und der bisher nicht ausreichend sicher funktionierenden Sensoren schwierig zu bestimmen ist, wird die Sättigungsdefizitsumme verwendet.

Um die Blattfläche in ein mögliches Transpirationsmodell zu integrieren, wurden an verschiedenen Gemüsearten mögliche Parameter zur Modellierung der Blattfläche untersucht. Bei allen Gemüsearten konnte ein hohes Bestimmtheitsmaß bei einer Funktion in Abhängigkeit der Kulturdauer festgestellt werden. Bei einem Blattflächenmodell ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Blattfläche auch entscheidend von der Genetik (Sorte) abhängt und bei Fruchtgemüse die Blattfläche während der Kulturdauer durch Pflegemaßnahmen reduziert wird.

Durch die Kombination der Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme und dem Kulturtag konnten die Nachteile der einzelnen Parameter ausgeglichen und ein etwas geringeres Bestimmtheitsmaß (0,71 bis 0,84) wie bei den Regressionsanalysen des Matrixpotentials (0,84 bis 0,93) errechnet werden.

Die Parameter der Regressionsfunktionen der klimatischen Faktoren sowohl bei einzelnen Gießakten als auch zwischen den Kulturen einer großen Variation. Damit ist eine allgemeingültige Empfehlung nicht möglich. Die Parameter müssen über entsprechende Optimierungsmodelle für jede Kultur und Kultursituation während des Kulturverlaufes angepasst werden.

Untersuchungen unterhalb einer Tropfstelle ergaben, dass aufgrund der starken Bodenunterschiede, Strukturänderungen während der Kultur und einer von der Wassermenge und Bodenart abhängigen Wasserverteilung eine exakte Vorhersage der maximalen Wasserspeicherfähigkeit und damit der maximal möglichen Gießwassermenge nicht möglich ist. Um eine Wasserversickerung zu vermeiden muss bei einem Anbau im gewachsenem Boden bei allen Kontrollstrategien die Wasserbewegung

unterhalb der Wurzelzone berücksichtigt werden. Dazu ist eine Matrixpotentialmessung notwendig.

Aufgrund des hohen Bestimmtheitsmaß und niedrigen Variationskoeffizienten sowie der Übertragbarkeit auf verschiedene Bodenarten und Kulturen ist die Matrixpotentialmessung als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung zu verwenden. Da die häufig eingesetzten Tensiometer bzw. Tensiometer, bauartbedingt Schwächen aufweisen sind diese Sensoren durch übergeordnete Modellrechnungen zu kontrollieren. Dazu ist die Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme und der Gießabstand zu verwenden. Die klimatischen Parameter müssen über entsprechende Modellrechnungen und der Analyse bereits ausgeführter Gießakte dem Pflanzenwachstum angepasst werden.

Nachdem bereits einige Prozessleitsysteme, die für die Bewässerung- und Klimasteuerung notwendigen Hardwarekomponenten in ein System integriert haben, muss die Verknüpfung auf Softwareebene stattfinden. Für eine Modellierung und Adaption der Modellparameter sind in die Prozessleitsysteme zusätzlich Speichermedien zur Datenarchivierung und entsprechende Programme zur Optimierung der Modellparameter zu integrieren.

Für einen größtmöglichen Datenaustausch zwischen den Prozessen ist es sinnvoll, die Steuer- und Regelalgorithmen zentral auf einem Leitrechner zu installieren und zu verwalten. Um den Verkabelungsaufwand zu reduzieren ist eine Dezentralisierung der In- und Outputkarten sinnvoll. Aufgrund der verbesserten Leistungsfähigkeit sind Prozessleitsysteme auf PC-Basis durchaus eine preisgünstige und flexible Alternative zu Spezialentwicklungen.

Neben der Verknüpfung der einzelnen Teilbereiche der Prozesssteuerung muss die Prozesssteuerung durch gemeinsame Übergabeschnittstellen in den gesamten Betriebsablauf integriert werden. So kann die Prozesssteuerung wertvolle Daten für die Anbauplanung liefern und auch von diesen Daten übernehmen.

7 THESEN

1. Der Wasserverbrauch eines Pflanzenbestandes wird im wesentlichen von den klimatischen Bedingungen, der Pflanze selbst und dem Boden beeinflusst.
2. Die wesentlichen klimatischen Einflussgrößen sind die Einstrahlung, das Sättigungsdefizit bzw. die Dampfdruckdifferenz.
3. Bei einem Anbau im gewachsenem Boden ist zur Vermeidung von Überschusswasser eine exakte Bewässerungssteuerung und eine Kontrolle der Wasserbewegung unterhalb der durchwurzelter Bodenzone notwendig.
4. Die Sickerwassermenge bei einer Tropfbewässerung ist entscheidend von der ausgebrachten Gießwassermenge abhängig. Bei einer Gießwassermenge von 400-500 ml pro Gabe ist im Gegensatz zu 600 ml pro Tropfstelle kein Sickerwasser aufgetreten.
5. Eine theoretische Berechnung der maximalen Gießwassermenge ist aufgrund der nicht exakt zu definierenden Tropfstellengröße, der differenzierten Feuchteverhältnisse in der Tropfstelle und die Heterogenität der Böden und damit der Wasserspeicherfähigkeit nur bedingt möglich.
6. Die Blattfläche hat einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe des Wasserverbrauches eines Pflanzenbestandes. Sie kann über einfach zu bestimmenden Größen, wie z.B. die Pflanzenhöhe bzw. den Kulturtag modelliert werden. Aufgrund der Sorteneigenschaft, der jahreszeitlich unterschiedlichen Kulturdauer und auch Pflegemaßnahmen ist eine laufende Korrektur notwendig.
7. Das Sättigungsdefizit der Luft ist als Triebkraft der Transpiration nur aussagekräftig, wenn die Blatttemperatur des Bestandes der Lufttemperatur entspricht. Ist dies nicht der Fall so ist die Dampfdruckdifferenz zwischen der Luft und der Blattoberfläche anzuwenden.
8. Zur Berechnung der Dampfdruckdifferenz ist die Bestimmung der Blatttemperatur notwendig. Neben der Frage der Messtechnik ist der Messort entscheidend. Je nach Messort treten an ein und dem selben Blatt Temperaturdifferenzen von $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ auf.
9. In den experimentellen Untersuchungen wurde das höchste Bestimmtheitsmaß zum Wasserumsatz beim Matrixpotential festgestellt. Der eingestellten Sollwerte können während der gesamten Kulturdauer beibehalten werden.
10. Die Einstrahlungssumme berücksichtigt den zwar verminderten, aber dennoch vorhandenen Wasserverbrauch in der Nacht nicht. Sie hatte insgesamt das niedrigsten Bestimmtheitsmaß zum Wasserumsatz.
11. Die Sättigungsdefizitsumme und Dampfdruckdifferenzsumme berücksichtigen das Schließen der Stomata der Nacht nicht. Das Bestimmtheitsmaß zwischen dem Wasserumsatz und der Sättigungsdefizit- bzw. Dampfdruckdifferenzsumme war höher als bei der Einstrahlungssumme.

12. Aus physikalischer Sicht ist die Dampfdruckdifferenz dem Sättigungsdefizit vorzuziehen. Da das Bestimmtheitsmaß zwischen dem Wasserumsatz und der Dampfdruckdifferenz nicht wesentlich höher war und für die Dampfdruckdifferenz, zusätzlich eine nicht ganz unproblematische Blattemperaturmessung notwendig ist, wird die Sättigungsdefizitsumme als möglicher Modellparameter in einem Transpirationsmodell empfohlen.
13. Aus den experimentellen Untersuchungen zu den klimatischen Messgrößen ist es nicht zu empfehlen nur einen Parameter als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung zu verwenden.
14. Durch eine Kombination der Einstrahlungssumme und Sättigungsdefizitsumme und dem Kulturtag konnten ähnliches Bestimmtheitsmaß wie beim Matrixpotential errechnet werden.
15. Das Matrixpotential, gemessen über Tensiometer, ist für die Steuerung der Bewässerung im gewachsenem Boden als Führungsgröße zu empfehlen. Durch entsprechende Kontrollmessungen in verschiedenen Bodentiefen kann die Gießwassermenge angepasst und Sickerwasserbildung verhindert werden.
16. Die zur Matrixpotentialmessung eingesetzten Tensiometer sollten aufgrund möglicher, hauptsächlich bauartbedingter Störungen, durch Modellrechnungen überwacht werden.
17. In entsprechende Modellrechnungen sind die ohnehin über den Klimacomputer erfassten Messwerte Einstrahlung, Temperatur und Luftfeuchte einzubeziehen.
18. Um die Modellgleichung an das Pflanzenwachstum anzupassen, ist der Kulturtag zu berücksichtigen.
19. Zur Integration von klimatischen Modellgrößen ist eine Kombination von Klima- und Bewässerungssteuerung in einem Prozessleitsystem notwendig. Da bei vielen Gewächshauscomputerherstellern bereits alle Komponenten in einem Hardwaresystem integriert sind, muss eine weitere Integration auf Softwareebene stattfinden.

8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|------------|--|----|
| Abb. 2.1: | Informationsgewinnung, Informationsverarbeitung und Aktion sind kennzeichnend für die Leittechnik (SCHÖN 1993). | 9 |
| Abb. 2.2: | Struktur eines PC-Leitsystems (SCHÖN 1993). | 10 |
| Abb. 2.3: | Gewächshausautomatisierung nach dem Leittechnerprinzip. | 12 |
| Abb. 2.4: | Gewächshausautomatisierung nach dem Prinzip der „Verteilten Intelligenz“. | 12 |
| Abb. 2.5: | Gewächshausautomatisierung nach dem Prinzip „Master/Slave“. | 13 |
| Abb. 2.6: | Vertikales (links) und horizontales (rechts) Aufgabensplitting auf Hardware- oder Softwareebene (SCHMIDT 1996). | 14 |
| Abb. 2.7: | Steuerung und Regelung als häufig eingesetzte Kontrollstrategien. | 15 |
| Abb. 2.8: | Prozessleitsystem ohne logische Verknüpfung der Klima- und Bewässerungssteuerung. | 16 |
| Abb. 2.9: | Einteilung der Anbaumethoden (STORCK 1994). | 18 |
| Abb. 2.10: | Die Klimaregelung als hierarchisches System mit drei Ebenen (TANTAU 1990). | 23 |
| Abb. 3.1: | Wasserpotentiale und Einflussfaktoren auf Wasseraufnahme, Wassertransport und Transpiration im SPAC (FRICKE und KRUG 1997); (MOHR und SCHOPFER 1992). | 24 |
| Abb. 3.2: | Analogiemodell für den Wassertransport in der Pflanze (MOHR und SCHOPFER 1992). | 25 |
| Abb. 3.3: | Wassergehalte in Abhängigkeit der Bodenart (EHLERS 1996). | 26 |
| Abb. 3.4: | Die Potentialverteilung in einer wassergesättigten Bodensäule (EHLERS 1996). | 28 |
| Abb. 3.5: | Beurteilung der Wasserbewegung mit Hilfe des hydraulischen Gradienten. | 29 |
| Abb. 3.6: | Optimale Matrixpotentialverhältnisse zur Verhinderung der Wasserversickerung bei einer tensioschalergesteuerten Bewässerung (BECK et al. 1995). | 29 |
| Abb. 3.7: | Wassergesättigte Bodenzonen unterhalb einer Tropfstelle bei verschiedenen Ausbringungsmengen (4-16 Liter) Niederschlagsdichte (Q) und Bodenarten (DASBERG und BRESLER 1985). | 30 |
| Abb. 3.8: | ENVIROSCAN zur Überwachung der Bodenfeuchte in verschiedenen Bodentiefen (SENTEK 1997). | 32 |
| Abb. 3.9: | Aufbau und Korrektur der Messwerte eines Tensiometers. | 33 |
| Abb. 3.10: | Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung bei unterschiedlichen Bodenarten. FK=Feldkapazität, PWP=Permanenter Welkepunkt (SCHACHTSCHABEL et al. 1989). | 34 |
| Abb. 3.11: | Einfluss der Wasserspannung (Matrixpotential) auf das Wachstum (BIERHUIZEN und VOS 1959). | 35 |
| Abb. 3.12: | Matrixpotentialverlauf und Mittelwert des Matrixpotentials bei Rucola im 9 cm Topf mit Ebbe-Flut-Bewässerung. Bewässerungssteuerung über Tensioschalter (100 und 400 hPa Einschaltpunkt) (KELL et al. 1997). | 35 |
| Abb. 3.13: | Licht und Wasser als Voraussetzung für die Photosynthese (GARDNER et al. 1985). | 36 |

| | | |
|------------|---|----|
| Abb. 3.14: | Weg der Wassermoleküle vom Xylem bis in die äußere Atmosphäre (NULTSCH 1991). | 37 |
| Abb. 3.15: | Modell zur Regelung bzw. Steuerung des stomatären Gastransportes (MOHR und SCHOPFER 1992). | 38 |
| Abb. 3.16: | Verhältnis der Raten von Transpiration (T) und Evapotranspiration (E_t) in Abhängigkeit des Blattflächenindex bei Hafer (EHLERS 1991). | 39 |
| Abb. 3.17: | Crop-Water-Stress-Index bei Luzerne nach IDSO 1982 in EHLERS (EHLERS 1996). | 40 |
| Abb. 3.18: | Das Wasserpotential der Luft in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte. | 41 |
| Abb. 3.19: | Sättigungsdefizit und Dampfdruckdifferenz eines gegenüber der Lufttemperatur (20°C) um 5°C wärmeren Blattes. | 43 |
| Abb. 3.20: | Dampfdruckdefizit, Sättigungsdefizit und Wasserpotential der Luft bei 100% relativer Luft feuchte, 20 °C Luft- und einer Blatttemperatur von 15°C (B), 20°C (A) und 25°C (C). | 44 |
| Abb. 3.21: | Häufigkeitspolygon der Differenz Blatt- Lufttemperatur (HEIßNER 1997). | 44 |
| Abb. 3.22: | Beziehung zwischen Globalstrahlung und Transpiration während verschiedener Wachstumsphasen bei Paprika, Tomate und Salat (GRAFF und ENDE 1981). | 45 |
| Abb. 3.23: | Einfluss der Spaltenweite (Öffnung der Stomata) und der Luftbewegung auf die Transpiration (MOHR und SCHOPFER 1992). | 46 |
| Abb. 3.24: | Zeitlicher Verlauf der Evaporation aus einem Boden in dem das Wasser nicht ersetzt wird (HARTGE 1978). | 47 |
| Abb. 4.1: | Transpirationsmodell und Einflussfaktoren auf die Transpiration von Pflanzen. | 51 |
| Abb. 4.2: | Versuchsaufbau zur Ermittlung der maximal möglichen Wassermenge pro Gießvorgang. | 54 |
| Abb. 4.3: | Versuchsaufbau zur Bestimmung von pF-Kurven. | 54 |
| Abb. 4.4: | Messorte zur Ermittlung des Bodenwassergehaltes in und um Tropfstellen. | 55 |
| Abb. 4.5: | Versuchsaufbau zur Ermittlung des Wasserverbrauchs verschiedener Gemüsearten in Abhängigkeit der Bodenfeuchte und verschiedenen klimatischen Größen. | 56 |
| Abb. 4.6: | Aufleitmethode zur Bestimmung des Wasserverbrauchs bei <i>Cucumis sativus</i> L. | 56 |
| Abb. 4.7: | Aufgezeichnete Masse und geschätzter Zuwachs bei <i>Brassica o. var. gongylodes</i> L. | 58 |
| Abb. 4.8: | Beispiel zur Berechnung des Wasserumsatzes (vw) eines Gießtaktes. | 58 |
| Abb. 4.9: | Masseverlauf und errechneter Wasserumsatz der Gießtakte bei <i>Brassica oleracea var. gongylodes</i> L. | 59 |
| Abb. 4.10: | Matrixpotentialverlauf und errechneter Matrixpotentialanstieg (IM) der Gießtakte bei <i>Bras sica oleracea var. gongylodes</i> L. | 59 |
| Abb. 4.11: | Einstrahlung und errechnete Einstrahlungssummen der Gießtakte bei <i>Brassica oleracea var. gongylodes</i> L. | 60 |
| Abb. 4.12: | Einfluss der Gießwassermenge pro Tropfstelle und Bewässerungsvorgang bei tensio- metergesteuerter Bewässerung (90 hPa) auf die Sickerwassermenge bei sandigem Lehm mit <i>Apium graveolens</i> L. | 61 |

| | | |
|------------|--|----|
| Abb. 4.13: | pF-Kurven verschiedener Bodenschichten eines weihenstephaner Gewächshausbodens (sandiger Lehm). | 62 |
| Abb. 4.14: | Theoretische Gießwassermenge pro l Bodenvolumen bei unterschiedlichem Matrixpotential der Bodenschicht 0-30 cm (sandiger Lehm). | 62 |
| Abb. 4.15: | Bodenfeuchteverhältnisse in und um die Tropfstellen vor und nach einem Bewässerungsvorgang mit 300 ml/Tropfstelle und Gabe bei sandigem Lehm. | 63 |
| Abb. 4.16: | Transpiration und Matrixpotential bei <i>Zantedeschia aethiopica</i> l. | 64 |
| Abb. 4.17: | Transpirationsmenge in Abhängigkeit des Matrixpotentials bei <i>Zantedeschia aethiopica</i> l. | 65 |
| Abb. 4.18: | Wasserumsatz und Matrixpotentialanstieg der Gießakte von <i>Lactuca sativa</i> l. | 66 |
| Abb. 4.19: | Wasserumsatz einzelner Gießakte in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs mit linearer und polynomischer Regressionsfunktion bei <i>Lactuca sativa</i> l. | 67 |
| Abb. 4.20: | Zeitlicher Verlauf des Wasserumsatzes, Matrixpotentialanstiegs und der Einstrahlung bei <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> l (9. Gießtakt). | 68 |
| Abb. 4.21: | Wasserumsatz aller Gießakte in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs mit linearer und polynomischer Regressionsfunktion. | 69 |
| Abb. 4.22: | Blattfläche in Abhängigkeit der Blattmasse (links), des Kulturtages (mitte) und der Laublänge (rechts) bei <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> l. | 72 |
| Abb. 4.23: | Blattfläche in Abhängigkeit des Kulturtages (links) und der Frischmasse (rechts) bei <i>Lactuca sativa</i> l. | 73 |
| Abb. 4.24: | Blattflächenentwicklung bei <i>Lycopersicon esculentum</i> var. <i>esculentum</i> l in Abhängigkeit der Kulturzeit (Tage nach Pflanzung) und der Pflanzenhöhe. | 73 |
| Abb. 4.25: | Blattfläche zum Erntezeitpunkt verschiedener Sorten <i>Lactuca sativa</i> III. | 74 |
| Abb. 4.26: | Wasserumsatz pro Pflanze und Woche in Abhängigkeit des Blattflächenindex bei <i>Lycopersicon esculentum</i> var. <i>esculentum</i> l. | 75 |
| Abb. 4.27: | Wasserverbrauch pro cm ² Blattfläche und Woche in Abhängigkeit der Kulturdauer bei <i>Lycopersicon esculentum</i> var. <i>esculentum</i> l. | 76 |
| Abb. 4.28: | Temperaturverteilung auf einem Blatt von <i>Lactuca sativa</i> l (links) und <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> l (rechts) an einem sonnigen Tag (03.02.1995, 10.00 Uhr). | 77 |
| Abb. 4.29: | Auswirkungen verschiedener Blatttemperaturen (Oberflächentemperatur) auf die Dampfdruckdifferenz aufgrund der Ergebnisse wie in Abb. 4.28 dargestellt bei <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> l. | 77 |
| Abb. 4.30: | Häufigkeitspolygon der Differenz von Blatt- und Lufttemperatur ($T_{bl} - T_L$) bei Tag und Nacht (<i>Lactuca sativa</i> II, 58.-61. Tag nach der Pflanzung). | 78 |
| Abb. 4.31: | Wasserumsatz und Einstrahlungssummen der Gießakte bei <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> l. | 79 |
| Abb. 4.32: | Wasserumsatz einzelner Gießakte in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme bei <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> l. | 80 |
| Abb. 4.33: | Zeitlicher Verlauf des Wasserumsatzes, Einstrahlungssumme und Einstrahlung bei <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> l (9. Gießtakt). | 80 |
| Abb. 4.34: | Wasserumsatz aller Gießakte in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme bei verschiedenen Gemüsearten. | 81 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Abb. 4.35: | Einstrahlungssummen zum Bewässerungszeitpunkt (IR_{Max}) in Abhängigkeit der Kulturtage (Tage n. Pflanzung) bei <i>Lactuca sativa</i> I, II und <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I. | 82 |
| Abb. 4.36: | Einfluss der Sollwerteinstellungen von einstrahlungs- und tensiometergesteuerten Varianten bei 3 Sätzen <i>Ocimum basilicum</i> mit Ebbe-Flut Bewässerung. | 83 |
| Abb. 4.37: | Einstrahlungssummen zum Bewässerungszeitpunkt der tensiometergesteuerten (120 hPa Einschaltpunkt) Variante von <i>Ocimum basilicum</i> mit Ebbe-Flut Bewässerung. | 83 |
| Abb. 4.38: | Einstrahlungssummen zum Bewässerungszeitpunkt bei <i>Ocimum basilicum</i> III mit Ebbe- Flut Bewässerung. | 84 |
| Abb. 4.39: | Wasserumsatz und Sättigungsdefizitsumme der Gießtakte bei <i>Lactuca sativa</i> II. | 85 |
| Abb. 4.40: | Wasserumsatz ausgewählter Gießtakte in Abhängigkeit der Sättigungsdefizitsumme bei <i>Lactuca sativa</i> II. | 86 |
| Abb. 4.41: | Zeitlicher Verlauf des Wasserumsatzes, Sättigungsdefizit, Sättigungsdefizitsumme und Einstrahlung bei <i>Lactuca sativa</i> II (6. Gießtakt). | 86 |
| Abb. 4.42: | Wasserumsatz aller Gießtakte in Abhängigkeit der Sättigungsdefizitsumme bei verschiedenen Kulturen. | 87 |
| Abb. 4.43: | Sättigungsdefizitsummen zum Bewässerungszeitpunkt (IS_{Max}) bei <i>Lactuca sativa</i> I und II und <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I. | 88 |
| Abb. 4.44: | Wasserumsatz und Dampfdruckdifferenzsumme der Gießtakte bei <i>Lactuca sativa</i> II. | 89 |
| Abb. 4.45: | Wasserumsatz ausgewählter Gießtakte in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenzsumme bei <i>Lactuca sativa</i> II. | 90 |
| Abb. 4.46: | Wasserumsatz aller Gießtakte in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenzsumme bei verschiedenen Kulturen. | 91 |
| Abb. 4.47: | Dampfdruckdifferenzsummen (ID_{Max}) zum Bewässerungszeitpunkt bei <i>Lactuca sativa</i> II und <i>Cucumis sativus</i> I. | 92 |
| Abb. 4.48: | Bestimmtheitsmaß des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter (Mittelwert aller Gießtakte und Gemüsearten). | 96 |
| Abb. 5.1: | Messfleckdurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zu Objekt eines berührungslosen Temperatursensors (RAYTEC 1992). | 105 |
| Abb. 5.2: | Einfluss der Messgenauigkeit der relativen Luftfeuchte auf das Sättigungsdefizit. | 107 |
| Abb. 5.3: | Flussdiagramm zur Bewässerungssteuerung über Matrixpotentialmessung und automatischer Anpassung der Gießmenge in Abhängigkeit der Feuchteverhältnisse unterhalb der Wurzelzone. | 110 |
| Abb. 5.4: | Modul zur Berechnung der Wassermenge pro Gießvorgang unter Berücksichtigung der Matrixpotentialverhältnisse unterhalb der Wurzelzone. | 110 |
| Abb. 5.5: | Flussdiagramm zur einstrahlungsabhängigen Bewässerungssteuerung. | 111 |
| Abb. 5.6: | Algorithmus zur Steuerung der Bewässerung nach mehreren Einflussgrößen. | 112 |
| Abb. 5.7: | Tatsächliche aufgetretene Sättigungsdefizitsumme und Trendrechnungen der letzten zwei und letzten drei Wertepaare bei <i>Lactuca sativa</i> II. | 113 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Abb. 5.8: | Baugruppen eines Prozessleitsystems zur Steuerung von Klima und Bewässerung | 114 |
| Abb. 5.9: | Datenbanksystem zur Verknüpfung von Klima- und Bewässerungssteuerung. | 115 |
| Abb. 5.10: | Schematischer Aufbau des dezentralen Prozessleitsystems mit zentraler Intelligenz der Firma Positronik. | 116 |
| Abb. 5.11: | Tabellarische Sollwerteingabe zur Verbesserung der Bedienfreundlichkeit. | 117 |
| Abb. 5.12: | Datenströme und Teilgebiete einer EDV-unterstützten Betriebsführung | 118 |

9 ABBILDUNGEN IM ANHANG

| | | |
|-----------|--|-----|
| Abb.-A 1: | Versuchsaufbau zur Bestimmung der optimalen Gießwassermenge mit <i>Apium graveolens</i> l. | 142 |
| Abb.-A 2: | Holzplatte an elektronischer Waage mit <i>Lactuca sativa</i> . | 142 |
| Abb.-A 3: | Mulchfolie zur Verhinderung der Evaporation von der aufgehängten Holzwanne bei <i>Lactuca sativa</i> . | 143 |
| Abb.-A 4: | Wasserdichte Wanne an elektronischer Waage mit <i>Cucumis sativus</i> in Containern und Tensiometern zur Messung des Matrixpotentials. | 143 |
| Abb.-A 5: | Handmessgerät eines berührungslosen Temperatursensors mit analogen Datenausgang (Firma Raytec) zur Messung der Blatttemperatur bei <i>Lactuca sativa</i> . | 144 |
| Abb.-A 6: | Kontaktthermometer durchstoßen die Blattfläche bei <i>Cucumis sativus</i> . | 144 |
| Abb.-A 7: | Temperatur-Luftfeuchte Sensor des KLIWADU-Systems mit LCD-Anzeige | 145 |
| Abb.-A 8: | Dezentrale Relaiskarte des KLIWADU-Systems mit 8 Relaisausgängen (Wechsler) und 8 digitalen Eingängen. | 145 |

10 TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|------------|--|----|
| Tab. 2.1: | Regelgruppen und hauptsächlich verwendete Führungsgrößen zur Optimierung der Wachstumsfaktoren im Gewächshausanbau. | 16 |
| Tab. 2.2: | Regelungstechnische Besonderheiten der Anbauverfahren mit und ohne Drainwasser. | 19 |
| Tab. 2.3: | Regelungstechnische Anforderungen der Wasserverteilsysteme. | 19 |
| Tab. 2.4: | Möglichkeiten zur Steuerung und Regelung der Bewässerung (PASCHOLD 1994). | 20 |
| Tab. 2.5: | In der Praxis häufig eingesetzte Methoden zur Bewässerungssteuerung und die Notwendigkeit manueller Eingriffe. | 21 |
| Tab. 2.6: | Anforderungen an die Bewässerungssteuerung. | 22 |
| Tab. 4.1: | Versuchszeitraum der durchgeführten Versuche | 53 |
| Tab. 4.2: | Einfluss des Matrixpotentials auf den Ertrag verschiedener Fruchtgemüsearten. | 65 |
| Tab. 4.3: | Lineare und polynomische Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit des Matrixpotentialanstiegs bei <i>Lactuca sativa</i> I. | 67 |
| Tab. 4.4: | Statistische Parameter zur Beurteilung des Matrixpotentials als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung bei <i>Lactuca sativa</i> , <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> und <i>Cucumis sativus</i> . | 70 |
| Tab. 4.5: | Blattflächenentwicklung bei <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I. | 71 |
| Tab. 4.6: | Blattflächenentwicklung bei <i>Lactuca sativa</i> I. | 72 |
| Tab. 4.7: | Blattfläche, Wuchshöhe, Blattflächenindex bei verschiedenen Gemüsearten. | 75 |
| Tab. 4.8: | Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme bei <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I. | 79 |
| Tab. 4.9: | Statistische Parameter zur Beurteilung der Einstrahlungssumme als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung bei <i>Lactuca sativa</i> , <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> und <i>Cucumis sativus</i> . | 84 |
| Tab. 4.10: | Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Sättigungsdefizitsumme bei <i>Lactuca sativa</i> II. | 85 |
| Tab. 4.11: | Statistische Parameter zur Beurteilung der Sättigungsdefizitsumme als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung bei <i>Lactuca sativa</i> , <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> und <i>Cucumis sativus</i> . | 88 |
| Tab. 4.12: | Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenzsumme bei <i>Lactuca sativa</i> II. | 90 |
| Tab. 4.13: | Statistische Parameter zur Beurteilung der Dampfdruckdifferenzsumme als Führungsgröße für die Bewässerungssteuerung bei <i>Lactuca sativa</i> und <i>Cucumis sativus</i> . | 92 |
| Tab. 4.14: | Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit von Einstrahlungs- und Sättigungsdefizitsumme bei <i>Lactuca sativa</i> , <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> und <i>Cucumis sativus</i> . | 93 |
| Tab. 4.15: | Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungs- und Dampfdruckdifferenzsumme bei <i>Lactuca sativa</i> und <i>Cucumis sativus</i> . | 94 |

| | | |
|------------|---|----|
| Tab. 4.16: | Regressionsfunktion des Wasserumsatz in Abhängigkeit der Einstrahlungs-, der Sättigungsdefizitsumme und dem Kulturtag bei <i>Lactuca sativa</i> , <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> und <i>Cucumis sativus</i> . | 95 |
| Tab. 4.17: | Regressionsfunktion des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der Einstrahlungssumme der Sättigungsdefizitsumme und der Blattfläche bei <i>Lactuca sativa</i> und <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> . | 95 |
| Tab. 4.18: | Steigung (a_x) und Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionsfunktionen ($y=ax$) des Wasserumsatzes aller Gießakte in l/m ² bzw. ml/Pflanze in Abhängigkeit des Matrixpotentials, der klimatischen Faktoren und dem Pflanzenwachstum. | 97 |
| Tab. 4.19: | Variationskoeffizienten der Steigung a der Regressionsfunktionen des Wasserumsatzes der einzelnen Gießakte bei verschiedenen Kulturen und Einflussfaktoren. | 98 |

11 TABELLEN IM ANHANG

| | |
|---|-----|
| Tab-A 1: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Apium graveolens</i> I. | 136 |
| Tab-A 2: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongylodes</i> I. | 136 |
| Tab-A 3: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Capsicum annuum</i> I. | 136 |
| Tab-A 4: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Cucumis sativus</i> I. | 136 |
| Tab-A 5: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Cucumis sativus</i> II. | 137 |
| Tab-A 6: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Lactuca sativa</i> I. | 137 |
| Tab-A 7: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Lactuca sativa</i> II | 137 |
| Tab-A 8: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Lactuca sativa</i> III | 137 |
| Tab-A 9: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Lycopersicon esculentum</i> var. <i>esculentum</i> I. | 138 |
| Tab-A 10: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Lycopersicon esculentum</i> var. <i>esculentum</i> II | 138 |
| Tab-A 11: Kulturdaten zu <i>Ocimum basilicum</i> I bis III in Töpfen im Ebbe-Flut-Verfahren | 138 |
| Tab-A 12: Kultur- und Versuchsdaten zu <i>Zantedeschia aethiopica</i> I. | 138 |
| Tab-A 13: Umrechnungsfaktoren für die Meßwerte üblicher Lichtmeßgeräte. | 139 |
| Tab-A 14: Erfaßte Meßgrößen und eingesetzte Sensoren. | 139 |
| Tab-A 15: Adressen der Hersteller der eingesetzten Messgeräte | 140 |
| Tab-A 16: Tatsächliche Erträge zu <i>Ocimum basilicum</i> Satz I bis III. | 141 |

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN

| Zeichen | Benennung | Einheit |
|--------------------|--|---------------------|
| A_0 | Modellparameter = 0,005212 | m^2W^{-1} |
| A_1 | Modellparameter = -11,83 | Wm^{-2} |
| A_0 | Steigung der Regressionsfunktion | - |
| A/D | analog-digital | - |
| A_x | Fläche | m^2 |
| B_0 | Modellparameter = 0,9087 | - |
| Bm^2 | Bruttoquadratmeter | m^2 |
| BV_0 | Funktion des Befeuchteten Bodenvolumens | m^3 |
| c_x | Kapazität | $Jkg^{-1}K^{-1}$ |
| CIM | Computer integrated manufacture | - |
| CO_2 | Kohlendioxid | - |
| CPT | Computersimulierte Pflanzenbestandstemperatur | - |
| CWSI | Crop-Water-Stress-Index | - |
| d | Tag | - |
| e | Dampfdruck der Luft | hPa |
| $e_{s(x)}$ | Sättigungsdampfdruck (Index x= Meßort) | hPa |
| $e_{s(T)}-e$ | Sättigungsdefizit der Luft | hPa |
| e_x | Dampfdruck (Index x = Meßort) | hPa |
| E | Evaporationsflux | $kgm^{-2}s^{-1}$ |
| ETp | potentielle Evapotranspiration | mm |
| E_x | Verdunstung | mm |
| $E(i)$ | Transpirationsrate in der Bestandsschicht (i) | $gm^{-2}s^{-1}$ |
| f | Haude Faktor | - |
| $f(v)$ | Windfunktion des Dalton Terms | m/s |
| g | Modellparameter = 0.004410 | ms^{-1} |
| $g(i)$ | Leitfähigkeit | ms^{-1} |
| G | Bodenwärmestrom | Wm^{-2} |
| GOU | Anzahl Geißvorgänge ohne unterschreiten des Sollwertes | St |
| GOU _{Max} | Maximale Anzahl Gießvorgänge ohne unterschreiten des Sollwertes | St |
| Grad(Ψ_G) | hydraulischer Gardient | - |
| h | Höhe | cm |
| ID | Dampfdruckdifferenzsumme zwischen den Gießtakten | hPah |
| IR | Einstrahlungssumme zwischen den Gießtakten | klxh |
| IS | Sättigungsdefizitsumme zwischen den Gießakten | hPah |
| I_x | Ströme | A |
| JT | Tag des Jahres | - |
| K | Modellparameter = 4,018 | m^{-2} |
| K | hydraulische Leitfähigkeit | $cmTag^{-1}$ |
| KT | Kulturtag (Tage nach Pflanzung) | St |
| $K()$ | Funktion der hydraulische Leitfähigkeit | cms^{-1} |
| L | spezeille Verdunstungswärme für 1 mm Verdunstungshöhe | Jkg^{-1} |
| LAI | leaf area index (Blattflächenindex) | m^2m^{-2} |
| $mw_{(t)}$ | Wasserumsatz zum Zeitpunkt t | kg |
| m_x | Masse | kg |
| MEZ | Mitteleuropäische Ortszeit | h |
| N | Anzahl der Beobachtungen | St |
| Nm^2 | Nettoquadratmeter | m^2 |
| $\Delta p_1(i)$ | Dampfdruckdifferenz zwischen Blattinneren und der Luft am Bezugs- punkt | hPa |
| Δp_L | Sättigungsdefizit der Luft | hPa |
| Δp_{BL} | Dampfdruckdifferenz Blatt-Luft | hPa |
| Pf | Pflanze | - |
| qw | Flux | $cm^3cm^{-2}s^{-1}$ |

| Zeichen | Benennung | Einheit |
|---------------|---|-----------------------------------|
| Q | Niederschlagsdichte | l/h |
| $Q_{(i)}$ | Bestrahlungsstärke in der Bestandsschicht i | Wm^{-2} |
| r | Radius | cm |
| r_x | Widerstand | sm^{-1} |
| Rn | Strahlungsbilanz | Wm^{-2} |
| Rs | Einstrahlung (Luxmeter) | lx |
| R | allgemeine Gaskonstante = 8,314 | $Jmol^{-1}K^{-1}$ |
| R^2 | Bestimmtheitsmaß | - |
| s | Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve | PaK^{-1} |
| sog. | sogenannte | - |
| SPAC | Soil Plant Atmosphere Coninuum | - |
| t | Zeitpunkt | h |
| T | Lufttemperatur | $^{\circ}C$ |
| TDR | time domain reflectrometry | - |
| TP | Taupunkt | $^{\circ}C$ |
| TST | Tropfstelle | - |
| Tr | Transpiration | mm |
| Tr_0 | Transpiration | $kgm^{-2}s^{-1}$ |
| T_x | Temperatur (Index x = Meßort) | $^{\circ}C$ |
| v_2 | Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe | ms^{-1} |
| vw | Wasserumsatz seit dem letzten Gießvorgang | lm^{-2} bzw. $lPflanze^{-1}$ |
| V | Volumen | l |
| V_0 | normales Molvolumen von Wasser = 18,015 $mlmol^{-1}$ | $mlmol^{-1}$ |
| W | Wasserverbrauch | mm |
| WSP_0 | Funktion der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens | m^3/m^2 |
| Z | Meßtiefe | cm |
| χ_x | Wasserdampfkonzentration (Index x = Meßort) | kgm^{-3} |
| χ_x^* | Wasserdampfkonzentration gesättigt (Index x = Meßort) | kgm^{-3} |
| Φ | Relative Luftfeuchte | % |
| Φ_0 | Referenzwert der relativen Luftfeuchte 0.7 | % |
| γ | Psychrometerkonstante, = 0,65 hPa/K | hPa/K |
| σ | Transpirationskonstante | m/s^{-1} |
| Ψ_x | Potentiale | hPa |
| Δ | Differenz | - |
| ϕ | relative Luftfeuchte | % |
| δ_0 | Dichte | kg/m^{-3} |
| \varnothing | Durchmesser | cm |

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN INDIZES

| Zeichen | Benennung |
|------------------|--|
| a | gegen Transpirationsstrom |
| aB | außerhalb des Blattes |
| ai | Umgebung (air) |
| at | Atmosphäre |
| b | im Blatt |
| bl | Blatt |
| blst | Blattstiel |
| bo | Boden |
| B | Blatttemperatur |
| Ba | Bodenart |
| BL | Blatt/Luft |
| c | Cuticula |
| d | Interzellularen |
| ex | Abgabe in Atmosphäre |
| E | Evaporation |
| G | gesamt |
| Gs | Grenzschicht |
| H ₂ O | Wasser |
| i | Blattschicht 1=obere; 2=mittlere; 3=untere |
| iB | innerhalb des Blattes |
| if-d | flüssig-dampfförmig |
| in | Aufnahmestrom |
| ID | Dampfdruckdifferenzsumme zwischen den Gießtakten |
| IR | Einstrahlungssumme zwischen den Gießtakten |
| IS | Sättigungsdefizitsumme zwischen den Gießtakten |
| KT | Kulturtag |
| L | Luft |
| M | Matrix |
| n | Nettostrahlung |
| O | osmotisch |
| P | Druck |
| Pf | Pflanzen |
| Pl | Masse der Holzplatte und Aufhängung |
| sy | Symplasten |
| S | Sättigung |
| sp | Spross |
| st | Stomata |
| T | Lufttemperatur |
| Tr | Transpiration |
| V | Versickerung |
| W | Wasser |
| Wa | Wasseroberfläche |
| wu | Wurzel |
| wu1 | Wurzelcortex |
| wu2 | in der Wurzel |
| Z | Gravitation |
| z | Messtiefe |
| z1 | Messtiefe 1 |
| z2 | Messtiefe 2 |

ANHANG

Tab-A 1: Kultur- und Versuchsdaten zu *Apium graveolens* L.

| | |
|--------------|---|
| Versuchsziel | Ermittlung der maximal möglichen Gießmenge |
| Versuchsort | Gewächshaus Haus 2 |
| Pflanzung | 16.05.1995 3 Pflanzen pro 10 l Container |
| Sorte | 'Monarch' |
| Bewässerung | Tropfbewässerung, System Volmatic 1 Tropfstelle pro Container tensiometergesteuert bei 90 hPa |
| Düngung | praxisübliche Mengen über Tropfbewässerung |
| Ernte | 18.08.1995 |

Tab-A 2: Kultur- und Versuchsdaten zu *Brassica oleracea* var. *gongylodes* L.

| | |
|--------------|--|
| Versuchsziel | Ermittlung des Wasserverbrauchs in Abhängigkeit des Matrixpotentials, Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme und Blattflächenentwicklung |
| Versuchsort | Gewächshaus Haus A |
| Pflanzung | 26.01.1995, 25x25 cm ² auf Wägeplatte und in gewachsenem Boden Wägeplatte: Dünnschichtkultur mit Folienabdeckung, 5 cm Substratstärke Substrat ED 73 |
| Sorte | 'Express Forcer' |
| Bewässerung | Tropfbewässerung (System Volmatic) Tensiometergesteuert bei 70 hPa Einschaltpunkt über KLIWADU-System |
| Düngung | Wägeplatte über Substrat ED 73 ohne zusätzliche Nachdüngung Bodenkultur praxisüblich über Tropfbewässerung |
| Ernte | 30.03.1995 |

Tab-A 3: Kultur- und Versuchsdaten zu *Capsicum annuum* L.

| | |
|--------------|---|
| Versuchsziel | Matrixpotentialerhöhung und Ertrag bei einem Anbau im gewachsenem Boden |
| Pflanzung | 21.03.96 Bodenkultur 3,0 Pflanzen pro m ² |
| Versuchsort | Gewächshaus Haus A |
| Sorte | 'Bendigo' |
| Bewässerung | Tropfbewässerung, Tropfabstand 30 cm, tensiometergesteuert 90 und 150 hPa |
| Düngung | Wöchentliche Nachdüngung insgesamt 11,3 gN/Pflanze |
| Ernte | Vom 14.05.96 - 22.10.96 |

Tab-A 4: Kultur- und Versuchsdaten zu *Cucumis sativus* L.

| | |
|--------------|--|
| Versuchsziel | Ermittlung des Wasserverbrauchs in Abhängigkeit des Matrixpotentials, Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme, Dampfdruckdifferenzsumme |
| Pflanzung | 06.05.1996 in 10 l pro Container; 1 Pflanze pro Container. Substrat ED 73 |
| Versuchsort | Gewächshaus Haus C |
| Sorte | 'Euphya' |
| Bewässerung | Tensiometergesteuert 60 hPa 450 ml/Container und Bewässerungsvorgang |
| Düngung | wöchentliche Nachdüngung mit Flory 2 (15:5:25 N:P ₂ O ₅ :K ₂ O) insgesamt 26 gN/Pflanze |
| Ernte | vom 06.06.96 - 15.08.96 |

Tab-A 5: Kultur- und Versuchsdaten zu *Cucumis sativus* II.

| | |
|--------------|--|
| Versuchsziel | Matrixpotentialerhöhung und Ertrag bei einem Anbau im gewachsenem Boden |
| Pflanzung | 04.04.97 Bodenkultur 1,48 Pflanzen pro m ² |
| Versuchsort | Gewächshaus Haus A |
| Sorte | 'Euphya' |
| Bewässerung | Tropfbewässerung (Tropfabstand 30 cm) Tensiometergesteuert 60 und 150 hPa |
| Düngung | Wöchentliche Nachdüngung insgesamt 27 gN/Pflanze |
| Ernte | Vom 05.05.97 - 15.08.97 |

Tab-A 6: Kultur- und Versuchsdaten zu *Lactuca sativa* I.

| | |
|--------------|---|
| Versuchsziel | Ermittlung des Wasserverbrauchs in Abhängigkeit des Matrixpotentials, Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme und Blattflächenentwicklung |
| Versuchsort | Gewächshaus Haus B |
| Pflanzung | 09.02.1995 25x25 cm ² auf Wägeplatte in Dünnschichtkultur mit Folienabdeckung, 5 cm Substratstärke Substrat ED 73. 1 Pflanze pro 5 l Container zur Ermittlung der Blattflächenentwicklung |
| Sorte | 'Erika' |
| Bewässerung | Tropfbewässerung (System Volmatic) Tensiometergesteuert bei 70 hPa Einschaltpunkt über KLIWADU-System |
| Düngung | Über Substrat ED 73 ohne zusätzliche Nachdüngung |
| Ernte | 30.03.1995 |

Tab-A 7: Kultur- und Versuchsdaten zu *Lactuca sativa* II

| | |
|--------------|---|
| Versuchsziel | Ermittlung des Wasserverbrauchs in Abhängigkeit des Matrixpotentials, Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitsumme, Dampfdruckdifferenzsumme und Blattflächenentwicklung. |
| Versuchsort | Gewächshaus Haus A |
| Pflanzung | 11.12.1995 25x25 cm ² auf Wägeplatte und in Containern Dünnschichtkultur mit Folienabdeckung, 5 cm Substratstärke Substrat ED 73 |
| Sorte | 'Maestro' |
| Bewässerung | Tropfbewässerung tensioschaltergesteuert 40 hPa Einschaltpunkt |
| Düngung | Wägeplatte über Substrat ED 73 ohne Nachdüngung |
| Ernte | 15.03.1996 |

Tab-A 8: Kultur- und Versuchsdaten zu *Lactuca sativa* III

| | |
|--------------|--|
| Versuchsziel | Blattfläche in Abhängigkeit der Sorte |
| Versuchsort | Gewächshaus Haus D |
| Pflanzung | 08.01.98 25x25 cm ² Bodenkultur |
| Sorte | Diverse |
| Bewässerung | Tropfbewässerung tensioschaltergesteuert 90 hPa Einschaltpunkt |
| Düngung | Nachdüngung 5,4 g N/m ² |
| Ernte | 16.03.98 |

Tab-A 9: Kultur- und Versuchsdaten zu *Lycopersicon esculentum* var. *esculentum* I.

| | |
|--------------|---|
| Versuchsziel | Blattflächenentwicklung und Wasserverbrauch bei der Kultur im gewachsenem Boden |
| Versuchsort | Gewächshaus Haus C |
| Pflanzung | 17.04.1997 2,35 Pfl/m ² im gewachsenem Boden |
| Sorte | 'Pannovy' |
| Bewässerung | Tensiometergesteuert, Einschaltzeitpunkt 90 hPa, Tropfbewässerung, 30 cm Tropfabstand, Wassermenge pro Gabe und Tropfstelle 260-360 ml. Wasserverbrauch 172 l/Pflanze, in 436 Bewässerungsvorgängen |
| Düngung | Über Tropfbewässerung in Tagesgaben Gesamtmenge: 12,7 g N/Pflanze, 20,2 g K ₂ O/Pflanze |

Tab-A 10: Kultur- und Versuchsdaten zu *Lycopersicum esculentum* var. *esculentum* II

| | |
|--------------|--|
| Versuchsziel | Matrixpotentialerhöhung und Ertrag bei einem Anbau im gewachsenem Boden |
| Pflanzung | 12.04.95 Bodenkultur 2,34 Pflanzen pro m ² |
| Versuchsort | Gewächshaus Haus B |
| Sorte | 'Pannovy' |
| Bewässerung | Tropfbewässerung 30 cm Tropfabstand Tensiometergesteuert 90 und 150 hPa |
| Düngung | Wöchentliche Nachdüngung insgesamt 21,9 gN/Pflanze |
| Ernte | vom 26.06.95 - 21.09.95 |

Tab-A 11: Kulturdaten zu *Ocimum basilicum* I bis III in Töpfen im Ebbe-Flut-Verfahren

| | 1. Satz | 2. Satz | 3. Satz |
|--|--|------------|------------|
| Aussaat: | 27.07.1997 | 01.09.1997 | 14.10.1997 |
| | Direktsaat in 9 cm Topf, ca. 30-35 Pflanzen pro Topf | | |
| Bewässerungsbeginn: | 06.08.1997 | 10.09.1997 | 24.10.1997 |
| Kulturrende: | 02.09.1997 | 09.10.1997 | 15.12.1997 |
| Düngung: | 0,01 % Flory 2 (15+5+25) über Ebbe-Flut Wasser | | |
| Substrat: | Eurohum (Fa. Patzer) | | |
| Tensiometergesteuerte Varianten | 120 hPa | 120 hPa | 120 hPa |
| Einstrahlungsabhängig-Gesteuerte Varianten | 200 klxh | 600 klxh | 600 klxh |
| | 300 klxh | 800 klxh | 800 klxh |
| | 400 klxh | 1000 klxh | 1000 klxh |
| | 600 klxh | 1200 klxh | 1200 klxh |

Tab-A 12: Kultur- und Versuchsdaten zu *Zantedeschia aethiopica* I.

| | |
|--------------|--|
| Versuchsziel | Matrixpotential und Transpiration |
| Pflanzung | Bereits ausgewachsene Pflanze in 5 l Container |
| Versuchsort | Kammer mit Kunstlicht Philips Agro SON-T |
| Bewässerung | Tensiometergesteuert 350 hPa |
| Düngung | Keine Nachdüngung |
| Ernte | vom 26.06.95 - 21.09.95 |

Tab-A 13: Umrechnungsfaktoren für die Meßwerte üblicher Lichtmeßgeräte.

| aus: | in : → | kLux | μmol/s/m² PAR | W/m² PAR | W/m² |
|---------------|--------|-------|---------------|----------|------|
| KLux | | 1 | 18 | 4,0 | 8,0 |
| μmol/s/m² PAR | | 0,056 | 1 | 0,22 | 0,43 |
| W/m² PAR | | 0,26 | 4,6 | 1 | 2 |
| W/m² | | 0,13 | 2,3 | 0,5 | 1 |

Quelle: (MC CREE in ELSNER 1988)

Tab-A 14: Erfasste Meßgrößen und eingesetzte Sensoren.

| Messgröße | Sensor | Einheit | Beschreibung |
|--|---------------------------------------|---------|--|
| KLIWADU-System | | | |
| Blatttemperatur | Molybdänfühler Kontaktthermometer | °C | Firma E&E Kontaktfläche 4x4mm², Klasse „A“; Messbereich -200 bis +150 °C; Abweichung Absolut (0°C) ±0,15 °C |
| Blatttemperatur | Infrarot, berührungslos | °C | Firma Raytec Handmessgerät mit analogen Ausgang 4-20 mA. Signal wurde über das KLIWADU-System über eine analoge Inputkarte aufgenommen. |
| Lufttemperatur | Molybdänfühler in belüftetem Kanal | °C | Firma Positronik Klasse „A“; Messbereich -30°C bis +70°C, Linearitätsfehler 0,05 °C, Abweichung Absolut ± 0,15 °C |
| Luftfeuchte | Kapazitiv HC 1000 in belüftetem Kanal | % | Firma Positronik Messbereich 0..100% r.F. bei Temp. -40°C bis 160 °C Linearität ± 2% r.F.; Hysterese ± 1,25% r.F. |
| Einstrahlung | Lichtsensorm | klx | Firma Kriwan Richtungsunabhängig, im Außenbereich über Gewächshausdächer angebracht, Messbereich 0..100 kLux = 0..10 V |
| Matrixpotential | Tensiometer | hPa | Firma UMS Messung des Bodenwasserpotentials über Diaphragma, Wasser und Druckumformer, Messbereich 0-850 hPa = pF 2,9 abzüglich Schaftlänge 1cm=1hPa. Signal 0 bis 100 mVdc ± 3 mV, Temperaturkompensiert, Hysterese typ. 0,1% FS, Langzeitstabilität 1 Jahr typ. 0,5% FS |
| Masse | elektronische Wägezellen | kg | Firma Hottinger Baldwin Messtechnik Wägezellen mit DMS-Meßsystem Messbereich 0-50 kg: Auflösung 0,05 kg |
| Plantputer-System (IBS Quedlinburg) | | | |
| Globalstrahlung | Solarimeter | | Firma Kipp und Sohn Thermofühler, 0-1300 Wm ⁻² , Genauigkeit ± 3%, Linearität ≤ 1%, Zeitkonstante 90 sec für 99 %. |
| Transpiration | Evaporimeter | | Firma IBS Quedlinburg |
| Sonstige Meßsysteme | | | |
| Blattfläche | | cm² | Firma Bachhofer LI 3000A bestimmt. Auflösung: 1mm². Genauigkeit ±2 % |

Tab-A 15: Adressen der Hersteller der eingesetzten Messgeräte

E+E GmbH
Langwiesen 7
A-4210 Engerwitzdorf

Postronik
Sysdorf 13 a
D-840721 Au/Hallertau
Tel.: 08752 681
Fax.: 08752 683

Raytec
1201 Schaffer Riad, Box 1820
Santa Cruz CA 95061-1820
Tel.: (408) 458-1110
Fax.: (408) 458-1239

Sentek PTY LTD
69 King William Street
Kent Town South Australia 5067
Tel.: 61-8-363-0839
Fax.: 61-8-362-8400

UMS
Umweltanalytische Meßsysteme
Linpurnstr. 51
D-80335 München
Tel: 089 18282 Fax.: 089 182829

Tab-A 16: Tatsächliche Erträge zu *Ocimum basilicum* Satz I bis III.

| Ernte: 02.09.97 | | | |
|-----------------|--------|--------|----------------|
| Variante | Höhe | Anzahl | Frischsubstanz |
| 120 hPa | 29,4 | 30,4 | 70,8 |
| 200 klxh | 29,675 | 30,45 | 70,75 |
| 300 klxh | 25,575 | 29,85 | 63,75 |
| 400 klxh | 26,75 | 29,5 | 62,95 |
| 600 klxh | 24,925 | 29,55 | 59,25 |

| Ernte: 09.10.97 | | | |
|-----------------|-------|--------|----------------|
| Variante | Höhe | Anzahl | Frischsubstanz |
| 120 hPa | 15 | 35 | 58,95 |
| 600 klxh | 14,6 | 31,8 | 52,31 |
| 1000 klxh | 14,25 | 32 | 45,95 |
| 800 klxh | 15,55 | 32,6 | 45,02 |
| 1200 klxh | 14,25 | 33,4 | 41,76 |

| Ernte: 15.12.97 | | | |
|-----------------|-------|--------|----------------|
| Variante | Höhe | Anzahl | Frischsubstanz |
| 120 hPa | 13,2 | 19,2 | 25,88 |
| 800 klxh | 12,25 | 21,6 | 24,09 |
| 600 klxh | 11,25 | 22,1 | 22,36 |
| 1000 klxh | 11,15 | 20 | 22,22 |
| 1200 klxh | 10,9 | 25,3 | 22,15 |



Abb.-A 1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der optimalen Gießwassermenge mit *Apium graveolens* l.



Abb.-A 2: Holzplatte an elektronischer Waage mit *Lactuca sativa*.



Abb.-A 3: Mulchfolie zur Verhinderung der Evaporation von der aufgehängten Holzwanne bei *Lactuca sativa*.

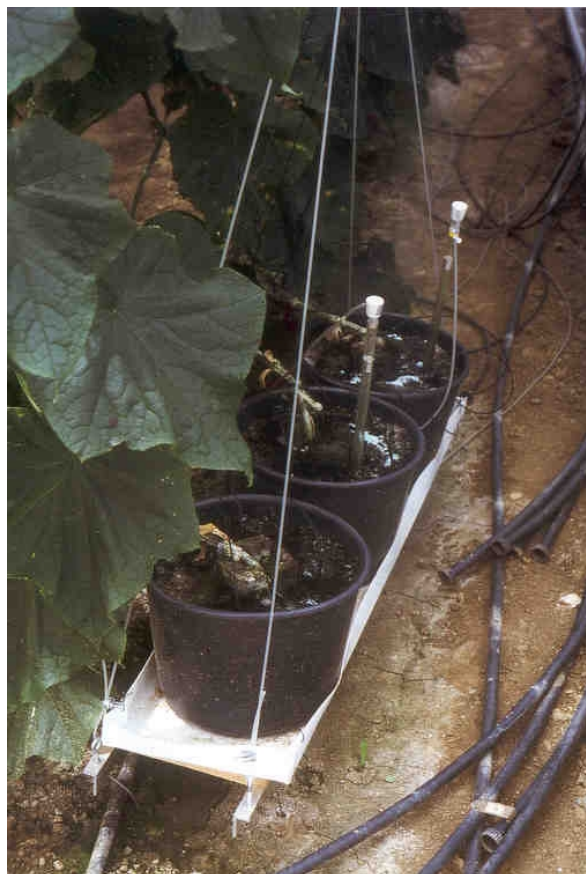


Abb.-A 4: Wasserdichte Wanne an elektronischer Waage mit *Cucumis sativus* in Containern und Tensiometern zur Messung des Matrixpotentials.



Abb.-A 5: Handmessgerät eines berührungslosen Temperatursensors mit analogen Datenausgang (Firma Raytec) zur Messung der Blatttemperatur bei *Lactuca sativa*.



Abb.-A 6: Kontaktthermometer durchstoßen die Blattfläche bei *Cucumis sativus*.



Abb.-A 7: Temperatur-Luftfeuchte Sensor des KLIWADU-Systems mit LCD-Anzeige

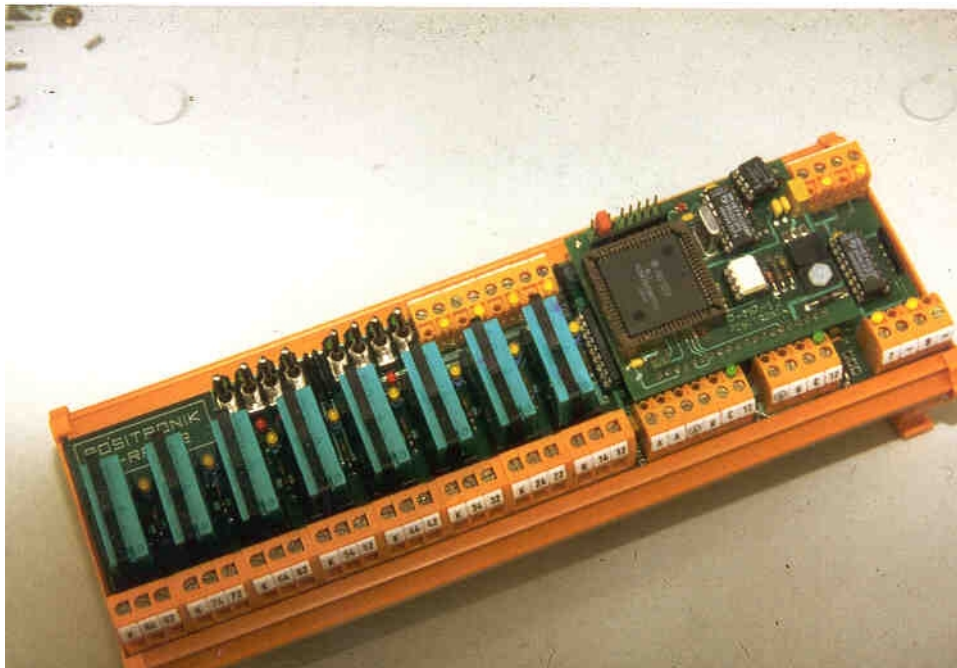


Abb.-A 8: Dezentrale Relaiskarte des KLIWADU-Systems mit 8 Relaisausgängen (Wechsler) und 8 digitalen Eingängen.

BEDANKUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen der Arbeit beitrugen.

Besonders möchte ich danken:

- Herrn Prof. U. Schmidt danke ich für die Überlassung des Themas, sein Interesse an der Arbeit und die Gewährung der Freiheit bei ihrer Durchführung.
- Herrn Prof. Dr. F.-W. Frenz, der durch sein Engagement und kritischen Anmerkungen wesentlich zum Gelingen der Arbeit beitrug.
- Allen Mitarbeitern des Institutes für Gemüsebau an der FH Weihenstephan die bei der Betreuung und dem Aufbau der experimentellen Untersuchungen mit Rat und Tat zur Hilfe standen.
- Den Nutzern des an der FH Weihenstephan entwickelten KLIWADU-Systems zur Übertragung von theoretischen Überlegungen in die gärtnerische Praxis.
- Meinen Eltern, die mir die Ausbildung ermöglichten.
- Meiner Frau für Ihr Verständnis und Ihre Unterstützung.

LEBENS LAUF

Name: Beck
Vorname: Michael, Emil
Geburtsdatum: 10.10.1965
Geburtsort: München
Familienstand: Verheiratet
Religion: RK
Wohnort: 85395 Wolfersdorf, Dr. Radlmaierstr. 3a
Eltern: Fritz Beck, geb. 28.12.1934, Gärtnermeister
Agnes Beck, geb. Küchler, geb. 23.02.43, Floristin
Derzeitige Dienststelle: Fachhochschule Weihenstephan
Staatliche Versuchsanstalt für Gartenbau
Institut für Gemüsebau
Am Staudengarten 7
D-85350 Freising

Schul- und Berufsausbildung:

1971 - 1975 Grundschule in 82024 Taufkirchen
1975 - 1977 Hauptschule in 82024 Taufkirchen
1977 - 1981 Realschule in 82024 Taufkirchen
1981 - 1983 Berufsausbildung Gärtner (Zierpflanzenbau)
1983 - 1985 Fachoberschule in 84036 Landshut, Ausbildungsrichtung Agrarwirtschaft
1985 - 1986 Bundeswehr in 85055 Ingolstadt
1986 - 1990 Fachhochschule an der FH Weihenstephan Fachbereich Gartenbau
Diplomarbeit:
"Gießen und Düngen beim Gewächshausanbau in Wasserschutzgebieten unter Berücksichtigung der Produktion im gewachsenem Boden."
1991 - 1992 Betreuung eines Forschungsauftrages des Ministeriums für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg zum Thema:

Entwicklung von EDV-gestützten Kulturtechniken sowie eines Bewässerungs- und Düngekonzepts zur Verhinderung von Austrägen ins Grundwasser beim Anbau im Gewächshaus in Wasserschutzgebieten."

Seit 1992 Feste Anstellung am Institut für Gemüsebau der FH Weihenstephan:

Weiterentwicklung EDV-Soft- und Hardware des KLIWADU-Systems (Computergesteuerte Bewässerung und Düngung)

Betreuung von geschlossenen Kultursystemen

Sortenversuche

LITERATUR

- (BECK et al. 1995) Beck, M.; Schlereth, H.; Frenz, F.-W.: Umweltgerechte Bewässerung. Deutscher Gartenbau. 49, 39, S.2282-2286,
- (BERGMANN, 1988) Bergmann, W.: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Stuttgart, Gustav Fischer, 1988
- (DASBERG und BRESLER 1985) Dasberg, S.; Bresler, E.: Drip irrigation manual. Israel, International Irrigation Information Center, 1985
- (DVWK, 1996) Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Band 238. Bonn, Wirtschafts und Verl.-Ges. Gas Wasser, 1996
- (BAKKER et al. 1995) Bakker, J.C.; bot, G.P.A.; Challa, H.; Van de Braak, N.J.: Greenhouse Climate Control an integrated approach. Wageningen, Giethoorn/NDD, 1995
- (BALDENDONCK 1997) Balendonck, Jos: Persönliche Mitteilung zum "Watemanprojekt" des Agricultural Research Departement IMAG-DLO in den Niederlanden. 1997
- (BIERHUIZEN und VOS 1959) Bierhuizen, J.F.; De Vos, N.M.: Th Effect of soil moisture on the growth and yield of vegetable crops.. Techn. bull. Institute for land and water management research. Wageningen. 11,
- (BIERHUIZEN und SLAYTER 1965) Bierhuizen, J.F.; Slayter, R.O: Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO₂ in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves.. Agricultural Meteorology. 2, S.259-270,
- (DVWK 1996) DVWK Hrsg.: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft. 238. Bonn, Wirtschafts und Verl. Ges. Gas und Wasser, 1996
- (EHLERS 1991) Ehlers, W.: Leaf area and transpiration efficiency during different growth stages.. Oats. J. agric. Sci., Cambridge. 116, S.183-190,
- (EHLERS 1996) Ehlers, W.: Wasser in Boden und Pflanze. Stuttgart, Ulmer Verlag, 1996

- (EIMERN 1984) Eimern, J.: Wetter- und Klimakunde: Lehrbuch d. Agrarmeteorologie. 4 Stuttgart, Ulmer, 1984
- (ELSNER 1988) Elsner, B.: Meßtechnik für das Licht. Gb+Gw. 24, S.1017-1020,
- (FISCHER und KALTHOFF) Fischer, P.; Kalthoff, F.: Loss of Volume and Substance of Peat and Substitutes for Peat. Poster ISHS Symposium "Growing Media and Hydroponics and composting of organic Matter.. Griechenland, 1999
- (FÖRSTER 1980) Förster, F.: Datensammlung für die Anbauplanung im Intensivgemüsebau.. 3 Hannover, Arbeitskreis für Betriebswirtschaft im Gartenbau e.V., 1980
- (FRENZ 1979) Frenz, F.-W.: Vollautomatische Steuerung von Bewässerungsanlagen beim Anbau von Gemüse im Gewächshaus. Gemüse. 15, 8,
- (FRENZ et al. 1988) Frenz, F.-W.; Emschermann, M.; Ohmayer, G.; Schlereth, H.: KliWaDu-computergesteuerte Bewässerung und Düngung. Deutscher Gartenbau. 42, 35, S.2266-2270,
- (FRENZ 1993) Frenz, F.-W.: Persönliche Mitteilung. Freising, 1993
- (FRICKE und KRUG 1997) Fricke, A.; Krug, H.: Influence of humidification and dehumidification on greenhouse climate as well as water relations and productivity of cucumber II. influences on plants . Gartenbauwissenschaft. 62, 6, S.241-248,
- (GOLDBERG et al. 1976) Goldberg, D; Gorant, B.; Rimon. D.: Drip Irrigation. Israel, Drip Irrigation Scientific Publications, 1976
- (GARDNER et al.1985) Gardner, F.P; Perarce, R.B.; Mitchell, R.L: Physiologie of Crop Plants. Ames, The Iowa State University Press, 1985
- (GRAFF und ENDE 1981) Graff, R.; Ende, J.: Transpiration and evapotranspiration of Glasshouses crops. Acta Horticulturae. Band 119. 1981 S.147-158,
- (HALLUARD et al. 1997) Halluard, N; Vialie, H.; Frenz, F.-W.; Röber, R.: Elatior Begonien im Trockenstreß. Deutscher Gartenbau. 51, 31, S.1705-1709,
- (HARTGE 1978) Hartge, K.H.: Einführung in die Bodenphysik. 1 Stuttgart, Enke, 1978

- (HARTGE 1989) Hartge, K.H.: Die physikalische Untersuchung von Böden. 2. Stuttgart, Enke, 1989
- (HASHIMOTO 1993) Hashimoto, Y.: The computerized greenhouse: automatic control applications in plant production. Computer integrated System for the cultivating process in agriculture and horticulture. California, Academic Press, 1993 S.175-196,
- (HEIßNER 1997) Heißner, A.: die Transpiration von *Capsicum annuum* im Gewächshaus: Messungen und Modellierung. Gartenbauwissenschaft. 62, 5, S.228-236,
- (HENDRICKS et al. 1992) Hendricks, L.; Ludolph, D.; Jatzkowski, M.: Wachstumskontrolle ohne Hemmstoffe. SFG Schriftenreihe. Aachen, Georgi Verlag, 1992
- (HENDRICKS 1997) Hendricks, L.: Neue Kulturverfahren mehr als neue Technik. Taspo Magazin. 1997, 10, S.10-11,
- (HÖFERT et al. 1994) Höfert, U; Wimmer, R.; Beck, M.; Frenz, F.-W.: Kein Austropfen bei Gefälle. Deutscher Gartenbau. 48, 50, S.2974-2978,
- (KELL et al. 1997) Kell, K.; Beck, M.; Frenz, F.-W.: Changing of plant growth by tensiometer controlled irrigation. Acta Horticulturae. Band 450. 1997 S.405-411,
- (KELLER 1997) Keller, T.: Produktinformationsmappe der Firma UMS; Bodnephysikalische Sensoren. Landshut, Firma UMS, 1997
- (IDSO 1982) Idso, S.B.: Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress.. Agricultural Meteorology. 27, S.59-70,
- (KRIWAN 1997) Firma Kriwan: INT 800 Benutzerhandbuch Art. Nr. 495.00095.1. Forchtenberg, Firma Kriwan, 1997
- (KRUSCHE 1995) Krusche, St.: Mit Technik und Pflanze Energie im Gewächshaus sparen. Gemüse. 31, 11, S.662-665,
- (LECKER 1985) Lecker, F.: Gasbefeuerte Geräte für CO₂-Anreicherung und Heizung in Gewächshäusern. Internationale Zeitschrift für rationelle Energieanwendung. 36, 1, S.39-42,
- (LECKER 1997) Lecker, F.: Bestimmung der Luftwechselzahl (persönliche Mitteilung). Freising, 1997

- (LÜHR und KLEISINGER 1998) Lühr, K.H.; Kleisinger, S.: Ein Prüfverfahren für Bodenfeuchtesensoren. Gartenbauwissenschaft. 63, 6, S.245-249,
- (MOHR und SCHOPFER 1992) Mohr, H.; Schopfer, P.: Pflanzenphysiologie. 3 Heidelberg, Springer, 1992
- (MACKROTH 1972) Mackroth, K.: Untersuchungen zum Gewächshausklima unter besonderer Berücksichtigung der Kühlmöglichkeiten. Löbau, nicht bekannt, 1972
- (MACKROTH et al. 1990) Mackroth, K.; Struck, W.; Bambach, G.: Geregelte Verhältnisse bei der Topfpflanzenbewässerung. Deutscher Gartenbau. 44, 48, S.3040-3046,
- (NULTSCH 1991) Nultsch, W.: Allgemeine Botanik. 9 Stuttgart, Georg Thieme, 1991
- (PASCHOLD 1994) Paschold: Wassereinsatz und ökologische Aspekte, Steuerung beim Freilandgemüsebau. Deutscher Gartenbau. 48, 50, S.2988-2992,
- (PHILIPP 1966) Philipp, J.R.: Plant water relations. Some physical aspects. Ann. Rev. Plant Physiol.. 17, S.245-268,
- (RAM 1997) Firma RAM: Klimacomputer Baureihe 610 - Technische Beschreibung. Herrsching, Firma RAM, 1997
- (RAYTEC 1992) Firma Raytec: Raynger PM 2EM,3,4,5; Operatur's Manual. Santa Cruz, Firma Raytec, 1992
- (ROSE and ROSE 1995) Rose, M.; Rose, Ma.: unbenannt (Abstact ISHS Symposium Sensor in Horticulture). Dänemark, 1995
- (RUGE 1966) Ruge, U.: Angewandte Pflanzenphysiologie. Stuttgart, Ulmer, 1966
- (SCHARPF 1997a) Scharpf, H.-C.: Fortschritt als Reaktion auf Druck von außen . Taspo Magazin. 1997, 10, S.6-8,
- (SCHARPF 1997b) Scharpf, H.-C.: Wann akzeptiert die Praxis Ergebnisse der Forschung?. Taspo Magazin. 1997, 10, S.4

- (SCHACHTSCHABEL et al. 1989) Schachtschabel, P.; Blume, H.-P.; Brümmer, G.; Hartge, K.-H.; Schwertmann, U.: Lehrbuch der Bodenkunde. 12 Stuttgart, Enke, 1989
- (SCHALVO 1991) Gesetzblatt für Baden-Württemberg: Verordnung des Umweltministeriums über Schutzbestimmungen in Wasser- und Quellwasserschutzgebieten und die Gewährung von Ausgleichsleistungen. Band 22. Stuttgart, 1991
- (SCHMIDT 1989) Schmidt, U.: Die Temperatur der Pflanzenbestandes als Regelgröße für die Klimaregelung im Gewächshaus unter besonderer Berücksichtigung der Heizungsregelung. Berlin, 1989
- (SCHMIDT 1992) Schmidt, U.: On-Line acquisition of transpiration as a basis for evological process control in greenhouses. Acta Horticulturae. Band 304. 1992 S.353-362,
- (SCHMIDT 1996) Schmidt, U.: Hat die Prozessautomatisierung im Gewächshaus eine Zukunft?. Gemüse. 32, S.18-23,
- (SCHMIDT 1997) Schmidt, U.: Persönliche Mitteilung anlässlich einer Lehrveranstaltung zur Einweisung der Versuchsanlage Fabigstraße. Berlin, 1997
- (SCHMIDT 1999) Schmidt, U.: Controlling of irrigation of greenhouse plants by using measured transpirationssum. unveröffentlicht, 1999
- (SCHÖN 1993) Schön, H.: Elektronik und Computer in der Landwirtschaft. Stuttgart, Ulmer, 1993
- (SCHRAGE 1997) Schrage, R.: Pflanzenschutz im Zierpflanzenbau heute - was bringt die Zukunft.. Taspo Magazin. 1997, 10, S.24-25,
- (SENTEK 1997) Sentek: EnviroScan, the steering wheel for your irrigation. Australien, Sentek, 1997
- (STORCK 1994) Storck, H. Hrsg: Taschenbuch des Gartenbaus. 3 Stuttgart, Ulmer, 1994
- (STRAUCH 1992) Strauch, K.-H.: Messfehler werden zu Kulturfehler I+II. Schriften zur Förderung des Gartenbaues (SFG-Serie). Aachen, Georgi GmbH, S.39-50,
- (TANTAU 1990) Tantau, K.-J.: Aktueller Stand bei Klimacomputern für den Gartenbau. Blickpunkt Regeltechnik für Klima, Bewässerung und Düngung (ZVG Report). 1990

(TANTAU 1995) Tantau, H.-J.: Ein modulares Konzept zur Klimaregelung von Gewächshäusern.
BDGL Schriftenreihe. Band 13. Bonn, 1995

(TANTAU 1995b) Tantau, H.-J.: Neue Temperaturregelstrategien ja, aber..... Technik im Gartenbau
Spezial. Aachen, Georgi, 1995

(THORNLEY und JOHNSON 1990) Thornley, J.H.M.; Johnson, I.R.: Plant and crop modelling - a mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford, Clarendon Press, 1990

(VAN den BOSCH 1998) Van den Bosch J.A.M.: Opportunities and bottlenecks for model applications
in practice. Acta Horticulturae. Band 456. 1998 S.505-507,

(WILHELM und MEYER 1992) Wilhelm, E.; Meyer, N.: Tropfbewässerungssysteme. Deutscher Gartenbau. 46, 14, S.861-868,